



**João Miguel do Céu
Condeço**

Sistemas de Recepção e Controlo de Rádios Online



**João Miguel do Céu
Condeço**

Sistemas de Recepção e Controlo de Rádios Online

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor Nuno Miguel Gonçalves Borges de Carvalho, Professor Associado com Agregação do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro e do Prof. Doutor Arnaldo Silva Rodrigues de Oliveira, Professor Auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

Dedico este trabalho aos meus pais, irmão, avós maternos e, em especial, aos meus avós paternos que já não se encontram entre nós.

o júri / the jury

presidente / president

Prof. Doutor Rui Manuel Escadas Ramos Martins
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Vogais / examiners committee

Doutora Ana Collado Garrido
Investigadora do Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (Arguente)

Prof. Doutor Nuno Miguel Gonçalves Borges de Carvalho
Professor Associado com Agregação da Universidade de Aveiro (Orientador)

Prof. Doutor Arnaldo Silva Rodrigues De Oliveira
Professor Auxiliar da Universidade Aveiro (Co-orientador)

agradecimentos

Gostaria de agradecer aos meus orientadores, Prof. Doutor Nuno Borges de Carvalho e Prof. Doutor Arnaldo Silva Rodrigues de Oliveira, pelo conhecimento e motivação transmitidos quer ao longo deste trabalho, quer ao longo da minha vida académica. Sem a ajuda e colaboração deles este trabalho não seria realizável.

Também gostaria de agradecer ao Mestre Hugo Mostardinha, responsável pelo laboratório do Instituto de Telecomunicações de Aveiro, pela sua sempre pronta disponibilidade em cooperar.

Queria ainda agradecer a todos os meus amigos presentes durante esta caminhada:

Abílio Almeida, Bruno Oliveira, Hugo Santos, Miguel Almeida, Paulo Oliveira, Victor Pascoal, aos meus afilhados, à minha namorada e a todos aqueles que contribuíram para quem sou e me apoiaram ao longo destes anos. Sem eles não teria conseguido chegar a este momento da minha vida.

Agradeço, em especial, ao meu amigo de longa data, Rui Gaspar, por desde cedo me ter despertado e incutido o gosto pela electrónica.

Palavras-chave

SDR, Software Defined Radio, Receptor de Rádio Online, CMX992, WebSDR, FUNcube, Eonics E4000, Realtek RTL2832U, DVB-T, Ezcap, RTLSDR.

Resumo

Esta dissertação de Mestrado surgiu no âmbito da criação de um sistema de recepção de rádio, baseado numa topologia de Software Defined Radio, para recepção de sinais remotamente, que permita aos utilizadores não só a recepção online do espectro, mas também controlo e interacção, em tempo real, com os diversos parâmetros do sistema.

Sob o ponto de vista teórico foi feita um estudo comparativo entre este tipo de receptores, baseados numa arquitectura definida por software, e os tradicionais receptores de rádio constituídos por blocos físicos de *hardware*, a fim de avaliar o comportamento prático destes sistemas.

No plano prático foram testados três soluções para dar resposta ao problema inicial a que esta dissertação se propôs - a criação de um receptor rádio online. Foi ainda desenvolvida, uma aplicação gráfica onde é feito o controlo do receptor e a análise gráfica do espectro recebido.

keywords

SDR, Software Defined Radio, Receptor de Rádio Online, CMX992, WebSDR, FUNcube, Eonics E4000, Realtek RTL2832U, DVB-T, Ezcap, RTLSDR.

abstract

The objective of this master's thesis was to create a radio reception system, based on a Software Defined Radio to receive remote signals that allow users, not only to receive an online reception of the spectrum, but also the control and interaction, in real time, with the diverse parameters of the system.

On the theoretical point of view, it was made a comparative study of this type of receivers, based on an architecture defined by software, and the traditional radio receivers constituted by physical hardware blocks, in order to evaluate the practical performance of these systems.

On a practical level, it was tested three solutions to answer to the initial problem that this thesis was proposed – to create an online radio receiver. It was also developed a graphic application, where it is done the receiver control and the graphical analysis of the received spectrum.

Conteúdo

Conteúdo

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Acrónimos

1 - Introdução.....	27
1.1. – Importância das Radiocomunicações.....	27
1.2. – As ondas de Radiofrequência.....	27
2 - Sistemas de Rádio	29
2.1. – Constituição básica de um sistema de Radiocomunicações	29
2.2. – Rádio Transmissor Elementar	30
2.3. – Principais Sistemas de Radiocomunicações	31
2.3.1. – Transmissão de uma onda contínua manipulada	32
2.3.2. – Transmissor básico de CW.....	33
2.3.3. – Modulação em amplitude (AM)	34
2.3.4. – Transmissor de AM.....	35
2.3.5. – As frequências laterais	36
2.3.6. – As bandas laterais.....	37
2.3.7. – Receptores de AM	38
2.3.7.1. – Receptor a cristal (Receptor de Galena)	39
2.3.8. – Receptor Regenerativo	41
2.3.9. – Receptor de radiofrequência sintonizado	41
2.3.10. – Receptor Super-heterodino	43
2.3.11. – Receptor de CW.....	45
2.3.12. – Comunicação em banda lateral única (SSB).....	46
2.3.12.1. – Princípios do SSB.....	46
2.3.12.2. – Transmissor básico de SSB	48
2.3.12.3. – Recepção de sinais de SSB.....	49
2.3.13. – Vantagens do SSB sobre o AM	50
2.3.14. – Modulação de Frequência (FM).....	50
2.3.14.1. – Desvio de Frequência em FM	51
2.3.14.2. – Transmissor básico de FM	52
3 - Software Defined Radio.....	55

3.1.- Introdução	55
3.2. – O que é um SDR?	55
3.3. – Arquitecturas de SDR	59
3.3.1. – Digitalização em banda base	59
3.3.2. – Digitalização em IF	59
3.3.3. – Digitalização em RF	60
3.4. – Vantagens do Software Defined Radio	61
3.5. – ADCs	64
4 - Protocolos.....	65
4.1. – Voice over IP	65
4.2. – Radio over ip	66
4.3. – Streaming	68
5 - Implementação do sistema SDR	71
5.1 – Escolha do chip de recepção	71
5.2 – Placa de desenvolvimento EV9920B.....	72
5.3 – Placa de interface PE0002	73
5.4 – Instalação e configuração do software da placa PE0002.....	73
5.5 – Receptor FUNcube Dongle	79
5.6. – WebSDR	82
5.6.1. – Instalação do WebSDR	83
5.6.1.1 – Configuração dos ficheiros websdr.cfg e index.html.....	85
5.7 – Receptor DVB-T	86
5.8 – GNU Radio.....	91
5.8.1. – Instalação do GNU Radio	91
5.8.2. – Funcionamento.....	92
5.8.3. – Aplicação prática	94
5.8.3.1. – Parâmetros.....	94
5.8.3.2. – Variáveis e funções matemáticas.....	95
5.8.3.3. – Fonte do sistema.....	96
5.8.3.4. – Sinks.....	97
5.8.3.5. – Filtro passa-baixo	98
5.8.3.4. – Squelch e controlo automático de ganho (AGC).....	99
5.8.3.5. – Desmoduladores	99
5.8.3.6. – Filtro passa-banda	100
5.8.3.7. – Reprodução do áudio	101
5.8.4. – Aplicação para stream.....	102
5.8.5. – Funcionamento do programa	105
6 - Conclusões	107

6.1. – Resumo do trabalho realizado	107
6.2. – Trabalho futuro	108
Apêndice A.....	111
Instalação e configuração da placa de desenvolvimento da CML	111
Apêndice B.....	115
Manual do utilizador das aplicações em GNU Radio	115
Bibliografia.....	121

Lista de Figuras

1.1: Alcance do campo magnético de baixa e alta frequência	28
2.1: Diagrama de blocos de um sistema básico de radiocomunicações.....	29
2.2: Diagrama de blocos de um rádio transmissor elementar	30
2.3: Forma da portadora de uma transmissão em onda contínua manipulada	32
2.4: Chaves de Morse	33
2.5: Diagrama de blocos simplificado de um transmissor de CW	34
2.6: Processo da modulação em amplitude (AM)	35
2.7: Diagrama de blocos simplificado de um transmissor de AM	36
2.8: Espectro de frequências correspondente ao sinal modulado	36
2.9: Forma de onda de AF correspondente à voz humana ou música.....	37
2.10: Espectro de frequências para uma portadora modulada pela voz humana ou música	38
2.11: Imagem do circuito interno de um receptor de rádio.....	39
2.12: Receptor de Galena	39
2.13: Diagrama de blocos de um rádio galena com as formas de onda	40
2.14: Diagrama de blocos simplificado de um receptor regenerativo	41
2.15: Diagrama de blocos simplificado de um receptor de rádio frequência sintonizado	42
2.16: Diagrama de blocos de um receptor super-heterodino de AM	43
2.17: Diagrama de blocos simplificado de um receptor de CW.....	45
2.18: Espectro do sinal SSB.....	46
2.19: Espectro do sinal de SSB (aumento da frequência do sinal modulador).....	46
2.20: Espectro do sinal de SSB (aumento da amplitude do sinal modulador).....	47
2.21: Espectro de frequências correspondente à banda lateral inferior.....	47
2.22: Diagrama de blocos de um transmissor SSB.....	48
2.23: Diagrama de blocos de um receptor SSB.....	49
2.24: Processo de modulação em frequência (FM).....	51
2.25: O desvio de frequência é proporcional à amplitude do sinal modulador.....	52
2.26: Diagrama de blocos de um transmissor de FM.....	53
2.27: Diagrama de blocos de um receptor para FM.....	53
2.28: Representação dos efeitos do limitador e desmodulador de FM.....	54
3.1: Microprocessador Intel 8035.....	56
3.2: Modelo ideal de SDR.....	57
3.3: Cenário típico de um SDR.....	57
3.4: O Universal Software Radio Peripheral – USRP.....	58
3.5: O Universal Software Radio Peripheral 2 – USRP2.....	58
3.6: Digitalização em banda base.....	59

3.7: Digitalização em IF.....	60
3.8: Digitalização em RF.....	60
3.9: Janela de recepção do SAQ.....	61
3.10: Diagrama de blocos do SAQrx.....	61
3.11: Arquitecturas de ADC, aplicações, resolução e frequências de amostragem.....	64
4.1: Visão geral do funcionamento do VoIP.....	65
4.2: Exemplo de uma rede RoIP.....	67
4.3: Janela do programa Echolink.....	67
4.4: Diagrama de uma rede de Echolink.....	68
4.5: Funcionamento da distribuição do streaming.....	69
5.1: Placa de desenvolvimento EV9920.....	71
5.2: Placa de interface PE0002.....	73
5.3: Instalação do driver da placa PE0002.....	74
5.4: Janela do programa ES000243.....	75
5.5: Janela de configuração dos parâmetros do CMX991/992.....	75
5.6: Ligação entre as placas EV9910B/EV9920B.....	77
5.7: Ligações dos instrumentos na placa de desenvolvimento EV9920B.....	77
5.8: Placa de desenvolvimento em recepção.....	78
5.9: Sistema final.....	79
5.10: FUNcube Dongle ligado a um computador.....	79
5.11: Diagrama de blocos do FCD.....	80
5.12: Circuitos internos do FCD.....	80
5.13: Diagrama de Blocos do E4000.....	81
5.14: Aspecto geral da plataforma WebSDR.....	83
5.15: Servidor WebSDR a correr.....	85
5.16: Circuitos internos do receptor DVB-T.....	87
5.17: Janela do programa HDSDR.....	90
5.18: Esquema do funcionamento do GNU Radio em conjunto com o RTLSDR.....	93
5.19: Grafo de fluxo do GNU Radio.....	93
5.20: Bloco "Options".....	94
5.21: Parâmetros do bloco "Options".....	95
5.22: Variáveis do sistema.....	95
5.23: Blocos com as definições do sistema.....	96
5.24: Bloco RTLSDR.....	96
5.25: Blocos das sinks utilizadas.....	97
5.26: Visualização do sinal recebido.....	97
5.27: Waterfall do sinal.....	98

5.28: Sinal em banda base.....	98
5.29: Filtro passa-baixo.....	99
5.30: Bloco do squelch.....	99
5.31: Bloco do AGC.....	99
5.32: Bloco do desmodulador de NBFM.....	99
5.33: Bloco do desmodulador de WBFM.....	100
5.34: Bloco do desmodulador de AM.....	100
5.35: Bloco selector da modulação.....	100
5.36: Bloco do filtro passa-banda.....	100
5.37: Configuração do bloco de gravação de áudio.....	101
5.38: Servidor de rádio via stream implementado em GRC.....	102
5.39: Blocos “XMLRPC Client”.....	102
5.40: Receptor FM/AM/SSB via implementado em GRC.....	103
5.41: Receptor FM/AM/SSB via stream implementado em GRC.....	104
5.42: Espectro de sinal WFM.....	105
5.43: Espectro de sinal NFM.....	105
5.42: Espectro de sinal AM.....	106

Lista de Tabelas

3.1 Análise de receptores de rádio.....	63
3.2 Comparação das características de diferentes ADCs.....	64
5.1 Desempenho do receptor RTLSDR.....	87
5.2 Lista de receptores compatíveis.....	89
5.3 Lista de chips de recepção.....	89

Acrónimos

ADC Analog-to-Digital converter
AF Audio Frequency
AGC Automatic Gain Control
AM Amplitude Modulation
ANACOM Autoridade Nacional de Comunicações
APRS Automatic Packet Reporting System
BFO Beat Frequency Oscillator
CW Continuous Wave
DAB Digital Audio Broadcasting
DVB-T Digital Video Broadcasting - Terrestrial
FCD FUNcube Dongle
FFT Fast Fourier Transform
FI Frequência Intermédia
FM Frequency Modulation
FPGA Field Programmable Gate Array
FSF Free Software Foundation
GRC GNU Radio Companion
GPIO General Purpose Input/Output
IF Intermediate Frequency
IP Internet Protocol
I/O Input/output
ISO International Organization for Standardization
LED Light Emitting Diode
LNA Low Noise Amplifier
MPEG Moving Picture Experts Group
NBFM Narrow Band FM
PC Personal Computer
PDA Personal Digital Assistants
PLL Phase-Locked Loop
PTT Push-to-Talk
RDS Radio Data System
RF Radio Frequency
RTP Real-time Transport Protocol
RoIP Radio Over Internet Protocol
SRD Software Defined Radio
SSB Single Side Band

UDP User Datagram Protocol
VFO Variable Frequency Oscillator
VGA Voltage Gain Amplifier
VLf Very Low Frequency
VoIP Voice over Internet Protocol
PSTN Public Switched Telephone Network
PABX Private Automatic Branch Exchange
TETRA Trans-European Trunked Radio
USB Universal Serial Bus
WBFM Wide Band FM
WEB World Wide Web

Capítulo 1

Introdução

1.1. – Importância das Radiocomunicações

O deslumbre da humanidade em relação às possibilidades das ciências e da tecnologia em geral, ocorrido desde o século XIX, intensificando exponencialmente no Século XX, deveu-se, em grande parte, ao desenvolvimento das telecomunicações. O Rádio e as tecnologias que lhes estão associadas, desempenharam um papel crucial.

Nos dias actuais, dificilmente encontramos um local (residência, escritório, loja) onde não exista pelo menos um equipamento onde a tecnologia de radiocomunicações esteja presente. Além de nos proporcionar um meio de recebermos informação (de forma passiva) noticiosa, cultural e de lazer, o rádio é também importantíssimo meio de comunicação. À parte do rádio convencional, onde a comunicação é suportada através do registo de áudio, hoje em dia existe um conjunto de sistemas que nos rodeiam que recorrem a sistemas de rádio para o seu funcionamento (sensores, controlos remotos, telemóveis, *walkie talkies*, redes TCP/IP através de WIFI, entre outros).

Em termos de distância e de impacto junto da humanidade, encontramos a exploração espacial como um exemplo maior das possibilidades práticas das radiocomunicações. Além da comunicação de áudio iniciada com o Sputnik, seguiram-se outras facetas extraordinárias ao nível da transmissão de imagens e controlo à distância na exploração do cosmos, como é o caso da recente sonda Curiosity lançada para o planeta Marte. Sem o auxílio das comunicações via rádio ou sistemas de rádio, tais desenvolvimentos, certamente, ainda não teriam ocorrido e a nossa evolução civilizacional estaria noutro patamar.

1.2. – As ondas de Radiofrequência

O funcionamento de um aparelho de radiocomunicação está intimamente ligado com as ondas electromagnéticas.

A primeira tentativa de se irradiar ondas electromagnéticas pelo espaço foi realizada pelo físico alemão Heinrich Rudolf Hertz (cognominado “o pai do rádio”) em 1888, com o seu transmissor de faíscas.

A produção de uma faísca, entre dois eléctrodos de cobre separados pelo ar, dava origem a um campo electromagnético cujas ondas se propagavam em todas as direcções do espaço. Por outro lado, é sabido que o campo electromagnético pode ser produzido também pela corrente

eléctrica. Quando uma corrente alternada de determinada frequência atravessa um fio condutor, verifica-se a produção de um campo magnético variável, na mesma frequência daquela corrente.

Se o fio condutor é alimentado pela corrente eléctrica doméstica (50Hz), o campo magnético produzido irá expandir-se e contrair-se numa frequência de 50Hz. Já no caso da corrente eléctrica resultante das faíscas mencionadas, a sua frequência é extremamente elevada. Em consequência, o campo electromagnético por ela produzido irá expandir-se e contrair-se também numa frequência bastante alta.

As ondas electromagnéticas produzidas por uma corrente eléctrica de frequência elevada são chamadas ondas de rádio frequência (RF), ondas de rádio, ondas radioeléctricas, ondas hertzianas (em homenagem ao físico que as descobriu). As ondas de rádio abrangem uma faixa de frequências que vai dos 100kHz até aos 300GHz.

As ondas electromagnéticas de baixa frequência possuem um alcance pequeno, por exemplo, as linhas de força do campo magnético produzido pela corrente eléctrica de 50Hz alcançam alguns poucos centímetros. Por outro lado, as ondas electromagnéticas de alta frequência possuem um alcance bastante elevado, podendo chegar a centenas ou até milhares de quilómetros, dependendo da intensidade da corrente eléctrica que produziu o campo magnético.

Na figura 1 pode-se ver a comparação entre os alcances de um campo magnético de baixa frequência e de um campo magnético de alta frequência. Como a finalidade das telecomunicações é transmitir mensagens (ou informações) a grandes distâncias, as ondas electromagnéticas utilizadas nesse processo são as ondas de rádio (ou ondas de RF), devido ao facto dessas ondas serem capazes de atingir grandes distâncias.

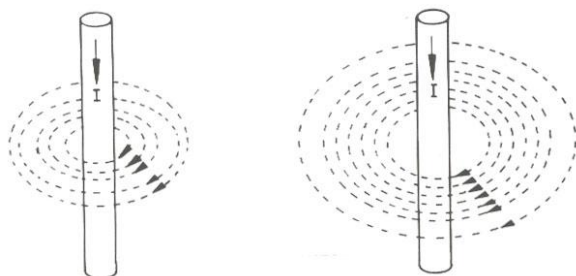


Figura 1.1: Alcance do campo magnético de baixa e alta frequência

A velocidade de propagação das ondas de rádio, no espaço, é aproximadamente igual à velocidade da luz, isto é, 300000Km/s. Tal facto torna possível estabelecer uma comunicação quase que instantânea entre duas lugares distantes milhares de quilómetros. Por exemplo, é possível efectuar uma comunicação entre a Terra e a Lua em pouco mais de 1s.

Capítulo 2

Sistemas de Rádio

2.1. – Constituição básica de um sistema de Radiocomunicações

Um sistema de comunicações por rádio é constituído, basicamente, por um transmissor e um receptor como está ilustrado na figura 2.1.

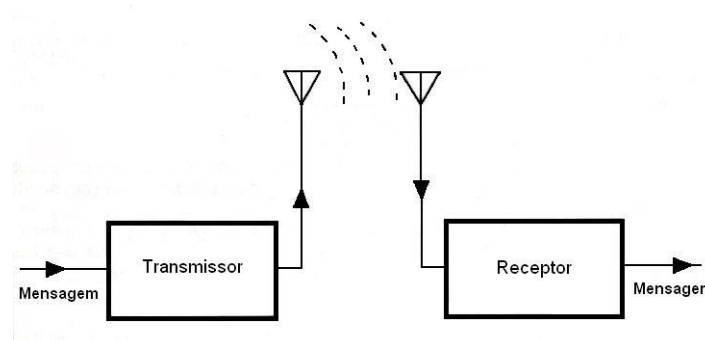


Figura 2.1: Diagrama de blocos de um sistema básico de radiocomunicações

No transmissor é gerado uma onda contínua de rádio frequência (RF), chamada de onda portadora, que irá “transportar” a mensagem a ser transmitida. Essa mensagem pode ser um som, como a voz, humana ou música, uma imagem de TV, ou qualquer outro tipo de informação.

No receptor, a onda captada pela antena sofre uma série de transformações, de onde se obtém novamente a mensagem transmitida.

A princípio, uma antena (transmissora ou receptora) pode ser imaginada como um simples fio de cobre estendido horizontalmente, a uma certa distância do solo.

Entre o transmissor e o receptor não existe ligação física. Há apenas o espaço que é o meio através do qual se propagam as ondas de rádio emitidas pelo transmissor e captadas pelo receptor.

Nos sistemas de radiocomunicações modernos são usadas ondas contínuas, tanto a amplitude como a frequência dessas ondas mantêm-se constantes durante os sucessivos ciclos, de modo que a recepção das mensagens transmitidas seja bastante facilitada.

As ondas contínuas de RF são produzidas por um circuito electrónico denominado oscilador de RF ou gerador de RF [1].

2.2. – Rádio Transmissor Elementar

Na figura 2.2 pode ser visualizado o diagrama de blocos de um transmissor de rádio elementar.

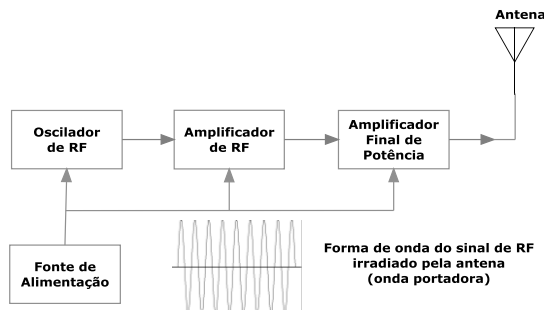


Figura 2.2: Diagrama de blocos de um rádio transmissor elementar

A primeira etapa do transmissor é o oscilador de RF. Este circuito produz uma tensão alternada de radiofrequência, sendo a amplitude dessa tensão relativamente baixa; por exemplo, um oscilador de RF típico pode fornecer uma tensão de RF com 0.5V de amplitude (tensão eficaz), na frequência de 7 MHz.

A etapa seguinte é o amplificador de RF, cuja função é amplificar adequadamente o sinal fornecido pelo oscilador de RF. Na saída desse amplificador é possível obter, por um exemplo, um sinal de RF com 50V de amplitude (tensão eficaz), na mesma frequência de 7 MHz.

Finalmente, a última etapa é o amplificador final de potência, sendo a sua função a de fornecer à antena uma corrente de RF com intensidade elevada. Essa corrente, ao circular pela antena, irá produzir um campo magnético cujas ondas (ondas de RF) irão propagar-se pelo espaço. Para que o amplificador final de potência possa funcionar satisfatoriamente, a tensão de RF aplicada na sua entrada (tensão de excitação) deve ter uma amplitude relativamente alta (50V, por exemplo), daí a necessidade da etapa amplificadora de RF.

A intensidade da corrente fornecida pelo amplificador final de potência, depende da potência de saída do transmissor.

A princípio, quanto maior essa potência, também mais intensa aquela corrente e, portanto, maior será o alcance das ondas de RF emitidas pelo transmissor.

As diversas etapas de um rádio transmissor são alimentadas por uma fonte de alimentação. A sua função é proporcionar tensões de polarização adequadas.

Na figura 2.2 também é mostrada a forma de onda do sinal de RF irradiado pela antena do transmissor. Trata-se de um sinal com amplitude uniforme (onda contínua) e com a mesma frequência do oscilador de RF.

Convém mencionar que nem todos os transmissores de rádio operam numa única frequência. Muitos deles, como os transmissores utilizados pelos radioamadores, têm possibilidades de trabalhar em determinadas “faixas de frequências”, pré-estabelecidas por normas [2].

Por exemplo a banda de 40 metros abrange as frequências desde 7 MHz até 7,3 MHz. Neste caso, oscilador de RF deve fornecer um sinal cuja frequência possa ser modificada (través de um condensador variável, por exemplo) desde 7 MHz até 7,3 MHz. Portanto, deveremos ter um oscilador de frequência variável que na prática, geralmente é denominado de VFO (*variable frequency oscillator*).

2.3. – Principais Sistemas de Radiocomunicações

No transmissor da figura 2.2, o sinal de RF transmitido é uma onda contínua, devido ao facto da sua amplitude ser uniforme em todos os ciclos.

Um sinal de RF deste tipo, por si só, não contém nenhuma informação útil. Entretanto é possível introduzir-lhe certas “modificações”, tornando-o capaz de “transportar” uma mensagem; por este motivo, o sinal de RF emitido pela antena de um transmissor de rádio é, usualmente chamado de onda portadora.

Convém salientar que a onda portadora não é a mensagem propriamente dita, mas sim o “veículo” que leva tal mensagem para um ponto distante.

Nas últimas décadas foram desenvolvidas inúmeras técnicas para “modificar” uma onda portadora, a fim de que ela possa transportar uma informação útil. Cada uma dessas técnicas caracteriza os diversos sistemas de radiocomunicações actualmente em uso, entre os quais os seguintes:

- Sistema de Radiotelegrafia (ou CW);
- Sistema de Modulação em Amplitude (ou AM);
- Sistema de Modulação em Frequência (ou FM);
- Sistema de Banda Lateral Única (ou SSB);

No sistema de radiotelegrafia, a mensagem é transmitida sob a forma de um código pré-estabelecido.

Este tipo de transmissão (talvez o mais eficiente e seguro), hoje em dia já em desuso, é utilizado nas comunicações entre estações de radioamadores e alguns serviços militares.

No sistema de modulação em amplitude (AM), a técnica empregada consiste em fazer com que amplitude da onda portadora (sinal de RF) varie no mesmo ritmo da amplitude do sinal correspondente à informação (ou mensagem) que se quer transmitir. Aqui, a frequência da portadora não varia. Este tipo de transmissão é largamente adoptado pelas emissoras de radiodifusão (broadcasting), nas faixas de ondas médias e curtas, sendo também utilizado na banda aérea e por radioamadores.

No sistema de frequência modelada (FM), a técnica utilizada consiste em fazer com que a frequência da onda portadora sofra deslocamentos num e noutro sentido, num ritmo igual à frequência do sinal correspondente à informação que se quer transmitir. Aqui, é a amplitude da portadora que não varia.

Este tipo de transmissão é adoptado pelas estações de radiodifusão que transmitem música em alta fidelidade (transmissões mono e estéreo). É também utilizado nas comunicações de maior responsabilidades como nos serviços de utilidade pública (corpo de bombeiros, polícias, seguranças, etc).

O sistema de banda lateral única (SSB) é uma variante do AM. Devido às suas excelentes características, é utilizado em larga escala pelas estações de radioamadores e por comunicações marítimas e militares de longa distância [1].

2.3.1. – Transmissão de uma onda contínua manipulada

No sistema de radiotelegrafia existem vários métodos para se transmitir uma mensagem sob a forma de código. O mais utilizado na prática consiste em se interromper a portadora de RF (onda contínua) durante intervalos de tempo regulares, seguindo um código convencional. Este método é denominado manipulação de portadora e neste tipo de transmissão utiliza-se código radiotelegráfico internacional, também conhecido por código de morse, em homenagem ao cientista que o idealizou, o físico norte-americano Samuel Morse.

No código morse, cada letra do alfabeto (A, B, C, ... X, Y, Z), cada algarismo (0, 1, 2, ... 7,8,9) e cada símbolo de pontuação (vírgula, ponto de interrogação, ponto de exclamação, entre outros) são representados por uma combinação adequada de traços (dah) e pontos (dih). A título de ilustração, a letra “A” é representada por um ponto e um traço, “._”.

Para se transmitir uma mensagem em código de morse, os traços e os pontos são emitidos sob a forma de ciclos com diferentes durações. Os pontos correspondem a um grupo de ciclos com pequena duração, enquanto os traços correspondem a um grupo de ciclos com longa duração (três vezes maior que a dos pontos). Deste modo combinando-se grupos de pequena e longa duração, é possível transmitir-se letras, algarismo e símbolos de pontuação, de modo a se formar palavras ou frases.

Para uma melhor compreensão, a figura 2.3 mostra como exemplo, a forma de onda portadora de RF quando se transmite apenas a letra “A”.

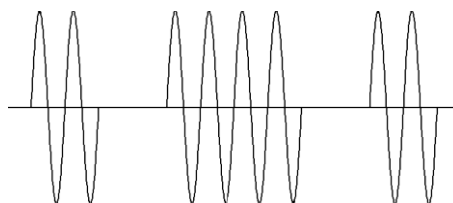


Figura 2.3: Forma da portadora de uma transmissão em onda contínua manipulada

Como pode ser observado, a onda portadora manipulada está representada por uma série de ciclos, de modo a formar grupos de pequena duração e de longa duração. Neste exemplo, o ponto foi representado por um grupo de dois ciclos, enquanto que o traço foi representado por um

grupo de seis ciclos, uma vez que a duração de cada traço é de três vezes maior que a duração de cada ponto.

O intervalo de tempo entre dois grupos de ciclos denomina-se “espaço” (figura 2.3) e a sua duração é igual à duração de um ponto. O intervalo entre duas letras numa palavra, tem duração igual à de um traço, enquanto o intervalo entre duas palavras numa frase, tem uma duração igual à de três traços.

A transmissão, pelo rádio, de uma mensagem em código morse, deste tipo, também é muito conhecida por CW (onda continua).

2.3.2. – Transmissor básico de CW

Na figura 2.5 está representado o diagrama de blocos simplificado de um transmissor de CW.

Para se produzir um grupo de ciclos com longa duração e curta duração, utiliza-se um interruptor especial chamado chave telegráfica (figura 2.4).

Quando o braço da chave é pressionado para baixo, os seus contactos fecham-se e o transmissor irradia a portadora de RF. Quando o braço da chave é puxado para cima, os seus contactos abrem-se e o transmissor deixa de irradiar a portadora de RF. Dosando-se os intervalos de tempo durante os quais os contactos da chave permanecem abertos ou fechados, é possível transmitir-se uma mensagem em código morse. Actualmente existem também chaves de morse com 2 contactos que permitem fazer com um dos contactos os pontos e com o outro os traços.

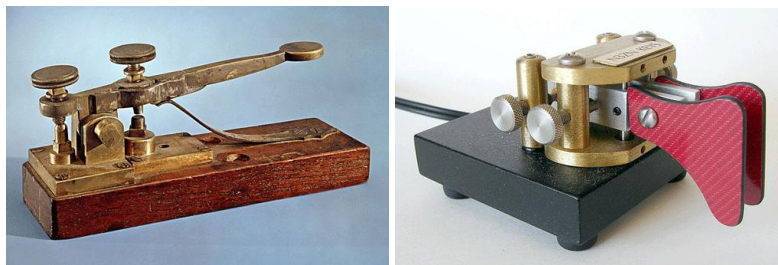


Figura 2.4: Chaves de Morse [3,4]

Na figura 2.5 também são mostradas as formas de onda do sinal produzido por um oscilador de RF (onda continua pura) e a forma de onda do sinal de RF irradiado pela antena do transmissor (onda continua manipulada).

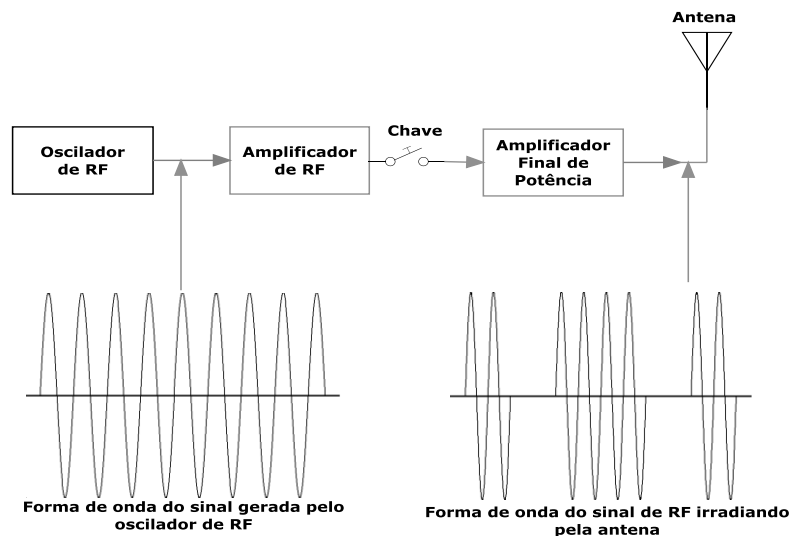


Figura 2.5: Diagrama de blocos simplificado de um transmissor de CW

2.3.3. – Modulação em amplitude (AM)

Uma onda de RF (onda contínua) cujas amplitudes e frequência não variam nos ciclos sucessivos, chama-se “onda portadora não modulada”. É o caso do sinal de RF irradiado pela antena do transmissor da figura 2.2.

Para se transmitir uma mensagem útil, é preciso “modificar” essa onda portadora. Por exemplo, é possível interromper a onda durante intervalos de tempo regulares, tal como se faz nas transmissões em código morse (figura 2.5).

Se quisermos transmitir, pelo rádio, os sons da voz ou música, devemos modular a onda portadora de RF. Existem várias técnicas usadas na modulação de uma onda portadora, o processo de modulação em amplitude (AM) é uma delas.

A técnica utilizada no AM consiste em fazer com que a amplitude da onda portadora varie na mesma cadência da amplitude do sinal que se quer transmitir. Por outro lado, a frequência da onda portadora não se altera durante a modulação. Como se sabe, os sons produzidos pela voz humana ou pelos instrumentos musicais estão na faixa das audiodfrequências (AF). Esta faixa corresponde às frequências que vão desde 15Hz até 20kHz.

Imaginando que se quer transmitir uma nota musical de 2kHz produzida por um piano. Em primeiro lugar deveremos transformar as vibrações sonoras, produzidas pelo piano, num sinal eléctrico da mesma frequência (2kHz), o que será feito utilizando um microfone.

O microfone é um dispositivo que transforma as vibrações sonoras, produzidas pelo piano, num sinal eléctrico de corrente alternada (CA), com a mesma frequência e mesma forma de onda do sinal original.

O processo de modelação em amplitude está ilustrado na figura 2.6. Em A encontra-se a forma de onda do sinal de AF (2kHz) fornecido pelo microfone. Em B esta a forma de onda da portadora não modulada; este sinal é produzido por um oscilador de RF. Como o sinal de AF

modula o sinal de RF, é chamado de sinal modulador. Em C é apresentada a forma de onda da portadora de RF (700kHz) modulada em amplitude pelo sinal de AF (sinal modulador).

Em AM, a frequência da portadora modulada permanece constante durante a modulação. Como tem a frequência é bastante elevada (700kHz no exemplo), o sinal de RF modulado em amplitude irá propagar-se facilmente através do espaço, podendo ser captado pela antena de um receptor situado a centenas ou milhares de quilómetros do transmissor.

Na figura 2.6C é visível que a amplitude da portadora modulada varia de ciclo para ciclo, sendo que esta variação é comandada pelo sinal modulador de AF (figura 2.6A).

Na figura 2.6C, as linhas a tracejado denominam-se de envoltórias da modulação e a sua forma de onda é a mesma do sinal modulador (sinal de AF).

Em suma, o processo da modulação em amplitude consiste em “misturar” o sinal de RF com o sinal de AF, num dispositivo electrónico de características não lineares chamado modulador de AM.

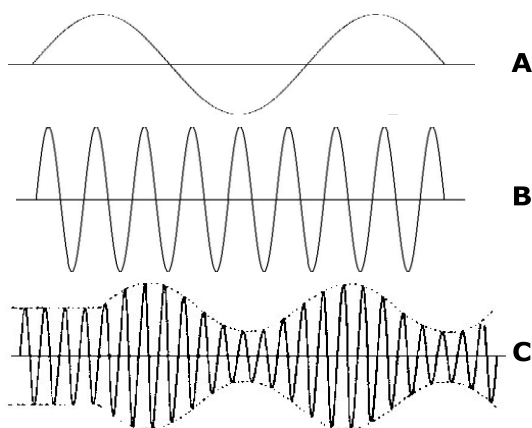


Figura 2.6 Processo da modulação em amplitude (AM)

2.3.4. – Transmissor de AM

Na figura 2.7 está o diagrama de blocos simplificado de um transmissor de AM.

O sinal modulador, ou seja, o sinal de AF proveniente de um microfone ou de outra saída de áudio é amplificado adequadamente pelo amplificador de AF.

Do mesmo modo, o sinal de RF (portadora não modulada), gerado pelo oscilador de RF, é convenientemente amplificado por amplificador de RF.

Tanto o sinal de AF (fornecido pelo amplificador de AF), como o sinal de RF (fornecido pelo amplificador de RF) são injectados na entrada do modulador de AM. Esta etapa executa a “mistura” do sinal de AF com o sinal de RF; na sua saída é obtido um sinal de RF modulado em amplitude pelo sinal de AF. Este sinal modulado sofre uma amplificação no amplificador de potência, quando então é irradiado pela antena do transmissor.

Na figura 2.7 é visível também as formas de onda ilustram o processo de modulação em amplitude.

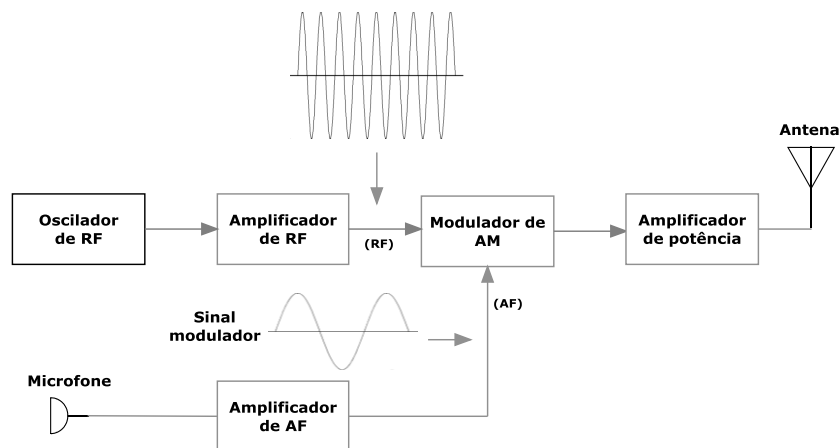


Figura 2.7: Diagrama de blocos simplificado de um transmissor de AM

2.3.5. – As frequências laterais

Quando um sinal de AF (sinal sinusoidal puro), com amplitude constante, modula uma portadora de RF, também com amplitude constante, esta portadora passa a ter uma amplitude variável. As envoltórias do sinal de RF modulado terão a mesma forma de onda do sinal modulador.

Por exemplo se estiver presente a forma de onda de um sinal de RF (700kHz) modulado em amplitude por um sinal de AF (2kHz). Fazendo uma análise desse sinal de RF modulado, verifica-se que ele corresponde à soma de três outros sinais de RF, que possuem amplitudes constantes e frequências iguais a 700kHz (frequência central), 702kHz (frequência soma) e 698kHz (frequência diferença).

Resumindo, quando um sinal de RF é modulado em amplitude por um sinal de AF, além da portadora de 700kHz, pela antena do transmissor também são irradiados outros dois sinais de RF: um deles com a frequência igual à soma das frequências dos sinais de RF e AF, isto é, $700\text{kHz} + 2\text{kHz} = 702\text{kHz}$, que se chama frequência lateral superior e o outro sinal que terá frequência igual à diferença entre as frequências dos sinais de RF e AF, isto é, $700\text{kHz} - 2\text{kHz} = 698\text{kHz}$, chamado de frequência lateral inferior.

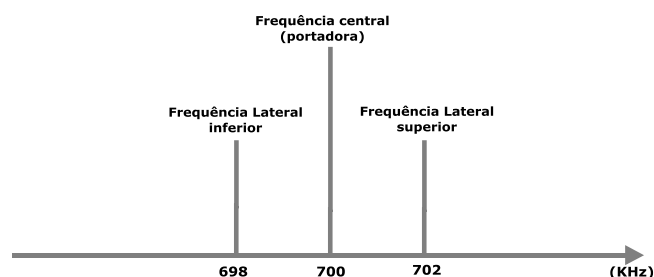


Figura 2.8: Espectro de frequências correspondente ao sinal modulado

Uma maneira de representar o fenómeno da modulação em amplitude, pode ser através do espectro de frequências descrito na figura 2.8. Num eixo horizontal são marcadas as frequências dos sinais de RF, perpendicularmente a esse eixo e através de pequenos segmentos de recta, são indicadas as amplitudes dos sinais de RF.

Observando o espectro da figura 2.8, é fácil notar que quanto maior a frequência do sinal modulador tanto maior será o afastamento das frequências laterais em relação à frequência central.

2.3.6. – As bandas laterais

Até agora o sinal modulador foi imaginado como sendo um sinal puro de AF como, por exemplo, o representado na figura 2.6. Esse sinal de AF é bastante regular: a sua amplitude máxima (de pico) é a mesma em todos os semi-ciclos; além disso, a sua frequência é constante.

Através da visualização num osciloscópio, o sinal eléctrico correspondente as vibrações sonoras produzidas pela voz humana ou por instrumentos musicais, possui uma forma de onda bastante irregular (figura 2.9), uma vez que nem a sua amplitude nem a sua frequência se mantêm constantes. Um sinal deste tipo pode ser considerado como constituído por um número bem grande de sinais com diferentes amplitudes e diferentes frequências (entre 15Hz e 20KHz), tratando portanto de um sinal complexo.



Figura 2.9: Forma de onda de AF correspondente à voz humana ou música

Em AM, quando o sinal modulador é a voz humana ou a música, são produzidas inúmeras frequências laterais. Por exemplo, supondo que a máxima frequência do sinal modulador seja 5kHz, obteremos o espectro de frequências da figura 2.10.

O espaço ocupado pela portadora e pelas duas bandas laterais (a inferior e a superior) é o que se denomina de canal de transmissão. A largura do canal de transmissão é igual ao dobro da frequência moduladora mais alta; no exemplo dado (figura 2.10) essa frequência é de 5kHz, resultando numa largura do canal igual a $2 \times 5\text{kHz} = 10\text{kHz}$. Portanto, numa transmissão de AM, a largura do canal depende da maior frequência do sinal modulador.

Para que o som (música ou voz) reproduzido por um receptor AM tenha uma boa qualidade, próxima da alta-fidelidade, será necessário transmitir um sinal de AF de aproximadamente 15kHz. Para tal, é necessário de uma largura de banda de $2 \times 15\text{kHz} = 30\text{kHz}$, pois as bandas laterais estendem-se até 15kHz de cada lado da portadora.

Caso fossem permitidas transmissões que ocupassem um canal assim tão largo (30kHz), o número total de emissoras que poderiam operar, por exemplo, na faixa de ondas médias (de 550kHz até 1600kHz) forçosamente seria reduzido. A fim de que um número razoável de emissoras possa transmitir numa determinada faixa, sem que exista uma interferência mútua entre tais emissoras, a largura de banda do canal de transmissão de AM foi fixada por norma.

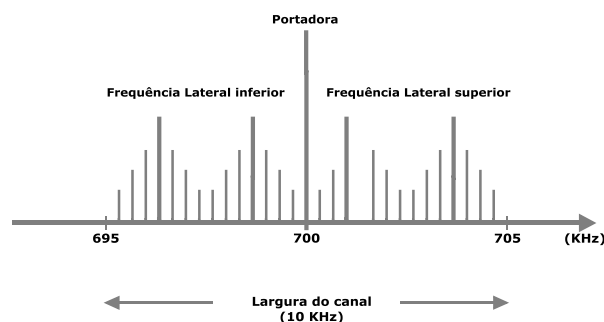


Figura 2.10: Espectro de frequências para uma portadora modulada pela voz humana ou música

Para as estações de radiodifusão, que transmitem música e voz a largura máxima do canal foi fixada em 10KHz com bandas laterais de $\pm 5\text{kHz}$ nos Estados Unidos, enquanto na Europa essa separação é de 9KHz com bandas laterais de 4.5kHz. Isto limita em 6kHz (Europa) a frequência máxima do sinal de AF a ser transmitido, o que é feito pelo próprio transmissor. Os ouvintes não desfrutaram, portanto de uma audição em alta fidelidade, numa recepção comum de radiodifusão em AM, mas mesmo assim o som reproduzido pelo receptor será satisfatório e inteligível.

Nas comunicações de AM, entre estações de radioamadores, onde se transmite apenas a voz e não música, a frequência áudio máxima de modulação foi fixada nos 3kHz. Isto resulta num canal de transmissão com 6kHz de largura, pois $2 \times 3\text{kHz} = 6\text{kHz}$ [39]. Este sistema de transmissão em amplitude modelada é muitas vezes designado pela sigla AM-DSB, que significa modulação em amplitude - banda lateral dupla.

2.3.7. – Receptores de AM

Os rádios fabricados hoje em dia são bastante sofisticados. Os seus circuitos são compostos de variados componentes electrónicos, e cada dia mais os seus circuitos são simplificados, graças ao desenvolvimento da electrónica e microelectrónica. Componentes clássicos como o condensador variável e o fio de quadrante para o ajuste de frequência são agora substituídos por circuitos de PLL, display e microprocessadores que permitem guardar as estações preferidas dos ouvintes. Mas analisemos como tudo começou.



Figura 2.11: Imagem do circuito interno de um receptor de rádio [5]

2.3.7.1. – Receptor a cristal (Receptor de Galena)

O rádio receptor mais elementar, utilizado nos primórdios da rádio (por volta de 1900) foi o receptor de Galena ou receptor a cristal. O principal constituinte deste receptor era um pequeno cristal de galena, um mineral composto de sulfeto de chumbo.

O cristal de galena permitia a passagem da corrente de RF num sentido, mas bloqueava no sentido oposto. Em linhas gerais, esse cristal funcionava como um díodo rectificador. O receptor de galena, logicamente, hoje em dia já não é usado, senão pelos principiantes ou como simples curiosidade académica.

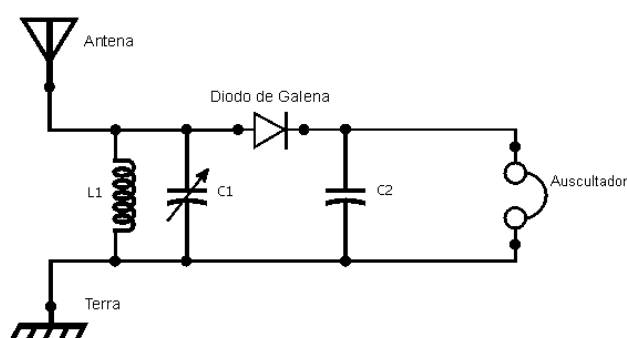


Figura 2.12: Receptor de Galena [6]

A antena receptora é ligada num dos extremos da bobine, o outro é ligado à terra.

A bobine L1, juntamente com o condensador variável C1 formam um circuito ressonante (LC paralelo), que constituem o circuito de sintonia do rádio. O condensador variável C1 permite o ajuste da frequência de ressonância do circuito LC, de forma a obter-se a sintonia das várias emissoras de rádio existentes na faixa de sintonia.

O díodo e o condensador C2 constituem o desmodulador de AM, também chamado de detector. Actualmente o cristal de galena pode ser substituído por um díodo semiconductor.

O condensador variável C1 pode ser do tipo utilizado nos pequenos rádios de AM. O condensador C2 deve ser da ordem de poucos nanofarads. Para a construção da bobine L1, basta enrolar 100 espiras de fio com cerca de 3 mm num tubo de ferrite de 1 cm de diâmetro, com qualquer comprimento. O auscultador é de cristal (alta impedância).

Para obter máxima eficiência, é importante o uso de uma boa antena e uma boa terra. As ligações à terra podem ser feitas numa tubagem metálica de água ou através de uma barra enterrada no solo. A antena é um simples fio estendido horizontalmente a uma certa altura do solo e isolado da terra, com comprimento de pelo menos 10 metros.

As ondas electromagnéticas, particularmente as ondas de rádio, propagam-se a grandes distâncias e são capazes de induzir pequenas tensões de RF em qualquer fio condutor que estiver no seu raio de alcance, inclusive numa antena receptora construída para esse fim. No caso deste receptor, as ondas emitidas pela antena do transmissor propagam-se pelo espaço e, ao incidirem sobre a antena receptora, nela induzem uma pequena tensão de RF, com a mesma forma da onda do sinal transmitido (sinal de RF modulado em amplitude).

Esta tensão de RF fará com que uma corrente eléctrica do mesmo tipo circule pela bobine da antena L1.

O circuito de sintonia do receptor está em ressonância com a onda portadora emitida pelo transmissor, a qual se quer captar. Assim, admitindo que a única tensão presente na bobine da antena seja a tensão correspondente ao sinal de RF da emissora sintonizada.

Esse sinal (ou essa tensão) de RF, ao passar pelo díodo, é rectificado, isto é, os seus semi-ciclos negativos são eliminados, restando apenas os semi-ciclos positivos.

Em seguida os picos dos semi-ciclos positivos do sinal de RF, são “suavizados” pelo condensador C2, de onde se recupera a envolvente da modulação, que nada mais que é do que o sinal de AF correspondente à informação enviada pelo transmissor.

No diagrama de blocos da figura 2.13 encontram-se as formas de onda dos sinais mencionados.

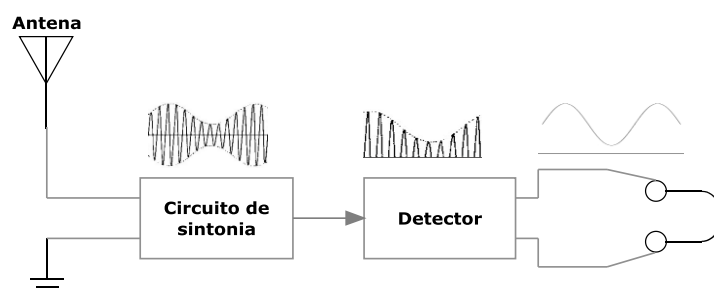


Figura 2.13: Diagrama de blocos de um rádio galena com as formas de onda

O díodo e o condensador C2 executam a desmodulação ou a detecção. O díodo é, portanto, um díodo detector de AM.

A desmodulação é o processo inverso ao da modulação. A modulação consiste em “acrescentar” à onda portadora (sinal de RF) as informações de AF, enquanto a desmodulação consiste em “extrair” do sinal de RF modulado as informações de AF.

No receptor de galena (figura 2.13), haverá uma corrente de áudio frequência a circular pelos auscultadores, e isso fará que eles reproduzam os sons correspondentes ao sinal

modulador. Supondo que o sinal modulador seja um sinal de AF com 1kHz, nos auscultadores do receptor iremos ouvir um apito de 1kHz.

O volume sonoro produzido nos auscultadores de um receptor de galena é muito fraco, pois depende da tensão induzida na antena receptora. Essa tensão na maioria das vezes, é uma pequena parcela do sinal emitido pelo transmissor e, portanto, possui uma amplitude bem reduzida. A não ser que o receptor esteja nas proximidades de uma estação transmissora potente, é que o sinal poderá ser ouvido nos auscultadores com um volume razoável.

Em resumo, tanto a sensibilidade como a selectividade do receptor galena são bastante precárias.

2.3.8. – Receptor Regenerativo

Neste tipo de receptor, uma parcela do sinal de saída é “restituída” à entrada, de modo a “reforçar” o sinal aí presente. Esse efeito é conhecido como realimentação ou regeneração, daí o seu nome.

Os sinais de RF são amplificados e, conseqüentemente, depois da detecção é obtido um sinal de AF mais forte. O som produzido pelo auscultador é, portanto, um pouco mais intenso que no receptor de galena.

Os receptores regenerativos, apesar de possuírem uma sensibilidade bem melhor do que os de galena, têm uma sensibilidade bastante fraca. Além disso, apresentam um sério inconveniente: se a parcela de realimentação não for bem controlada, o circuito começa a oscilar, convertendo-se num transmissor. Ou seja, o receptor irradia sinais de RF pela sua própria antena, perturbando, assim, os outros receptores que estiverem próximos.

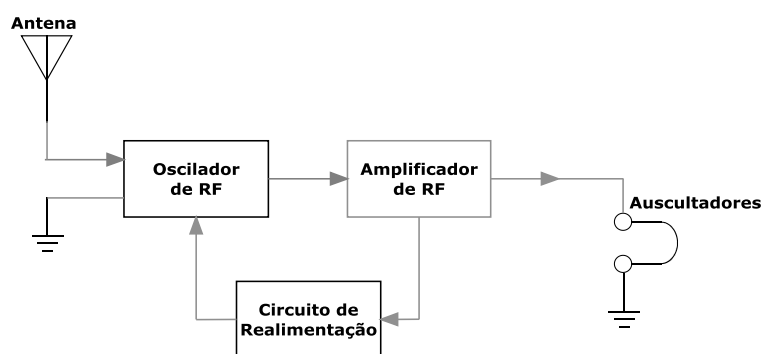


Figura 2.14: Diagrama de blocos simplificado de um receptor regenerativo

2.3.9. – Receptor de radiofrequência sintonizado

O receptor de radiofrequência sintonizado, ganhou popularidade por volta de 1920. Este receptor não apresentava os problemas de oscilação do receptor regenerativo.

A figura 2.15 mostra o digrama de blocos simplificado de um receptor de radiofrequência sintonizado.

O sinal captado pela antena é amplificado sucessivamente por duas ou mais etapas amplificadoras de RF sintonizadas. A principal finalidade destes amplificadores é proporcionar uma selectividade e uma sensibilidade maior de que as do receptor regenerativo.

A selectividade de um receptor indica a capacidade que ele tem de seleccionar apenas um sinal entre todos aqueles que chegam até à sua antena, estes sinais têm frequências muito próximas. A sensibilidade indica a capacidade que o receptor tem de captar sinais fracos. Em geral quanto maior o numero de amplificadores sintonizados de RF, tanto melhor serão a selectividade e a sensibilidade do receptor.

O receptor da figura 2.16 possui três circuitos sintonizados, comandados simultaneamente por um único condensador variável. Este condensador é do tipo triplo, ou seja, possui três secções que são controladas por um eixo comum. Movimentando-se o eixo desse condensador triplo, é possível captar-se todas as emissoras que transmitem, isto é, este condensador permite a sintonia dos três circuitos na mesma frequência.

A amplitude do sinal de RF presente na entrada do circuito detector (figura 2.15) é bem maior do que a amplitude do sinal de RF captado pela antena do receptor. Tal facto deve-se à acção dos amplificadores sintonizados de RF, o que se traduz numa maior sensibilidade do receptor.

Depois da detecção (ou desmodulação) desse sinal de RF, o sinal de áudio frequência resultante irá excitar o amplificador de AF. O sinal de AF obtido na saída do amplificador já tem a potência suficiente para excitar um altifalante.

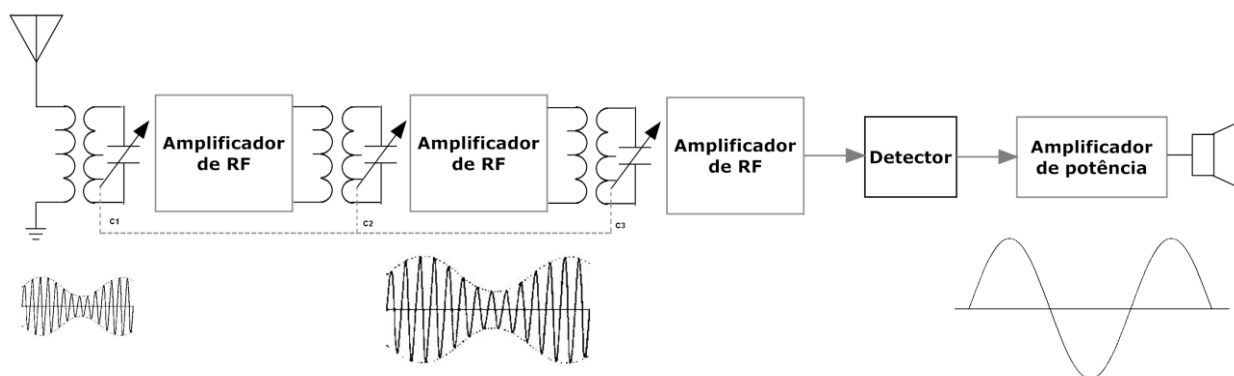


Figura 2.15: Diagrama de blocos de um receptor de rádio frequência sintonizado

O altifalante, da mesma forma que o auscultador, transforma a corrente eléctrica de AF em vibrações mecânicas, de modo a reproduzir os sons audíveis.

Resumindo, no funcionamento do receptor de rádio frequência sintonizada (RFS), podemos destacar três funções distintas que ele realiza: a primeira é a amplificação de RF, a segunda é a detecção ou desmodulação, a última é a amplificação de AF.

2.3.10. – Receptor Super-heterodino

O receptor de rádio frequência sintonizado apesar de se ter constituído num notável aperfeiçoamento em relação aos anteriores (galena e regenerativo), ainda apresentava muitos inconvenientes.

Uma das deficiências notadas nesse receptor era a dificuldade em obter-se uma amplificação uniforme dos sinais de todas as emissoras que operavam na faixa sintonizada (ondas médias por exemplo), por esses sinais terem frequências diferentes.

Por outro lado, quando se acrescentavam vários estágios sintonizados de amplificação de RF, a fim de melhorar a sensibilidade e a selectividade no receptor, a banda passante do aparelho tornava-se demasiado estreita (ou aguda) e isso prejudicava a sua fidelidade, isto é, a qualidade do som reproduzida no altifalante do receptor.

A fim de solucionar esses problemas, os fabricantes de receptores desenvolveram inúmeras pesquisas com o intuito de projectar um outro circuito que permitisse, sem prejudicar a fidelidade da recepção, a amplificação sucessiva de uma única frequência, com a máxima eficiência, qualquer que fosse a frequência da emissora sintonizada (sinal captado pela antena do receptor).

Essas pesquisas resultaram no receptor super-heterodino. O seu desempenho foi tão satisfatório que constitui ainda hoje, o sistema de recepção mais utilizado nas radiocomunicações (CW, AM, SSB, FM, etc).

Inicialmente os receptores super-heterodinos eram fabricados com válvulas, após o aparecimento do transistor por volta de 1950, os receptores super-heterodinos passaram a utilizar exclusivamente dispositivos semicondutores (diodos, transistores, circuitos integrados).

Na figura 2.17 o diagrama de blocos simplificado mostra as diversas etapas que constituem um rádio receptor super-heterodino de AM.

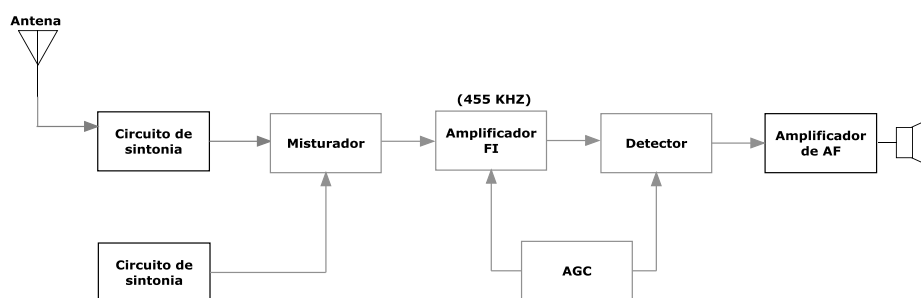


Figura 2.16: Diagrama de blocos de um receptor super-heterodino de AM

A etapa de entrada do receptor é o circuito de sintonia, a sua função é seleccionar um dos inúmeros sinais de RF que chegam até à antena do aparelho, sinais esses correspondentes às diversas estações transmissoras.

A outra etapa, independente do circuito de sintonia, é constituída por um circuito oscilador de RF. Trata-se do oscilador local, cuja função é gerar um sinal de RF, com amplitude constante a fim de ser misturado com o sinal captado pela antena do receptor (sinal de RF modulado em

amplitude). A mistura destes dois sinais de RF é chamada de batimento super-heterodino. A etapa que faz esse batimento chama-se de misturador, e é um circuito de características não lineares, processo este que na prática também é conhecido por conversão de frequências.

Como resultado do batimento super-heterodino, obtém-se na saída do misturador várias frequências, umas das quais é a diferença entre o sinal do oscilador local e o sinal seleccionado pelo circuito de sintonia; ou seja: a frequência do oscilador local menos a frequência do sinal sintonizado é igual à frequência diferença.

A frequência diferença mais conhecida por frequência intermédia (FI), tem as mesmas características do sinal de RF porem a sua frequência é mais baixa e, o que é muito importante, não varia, qualquer que seja a emissora sintonizada. Assim, por exemplo sintonizando uma emissora das faixas de onda média, cuja frequência de transmissão seja de 840kHz ou uma emissora de ondas curtas, cuja frequência seja de 21MHz, a FI será sempre a mesma.

A etapa seguinte é o amplificador da FI cuja função, é amplificar o sinal da FI fornecido pelo misturador. O valor típico da FI dos receptores super-heterodinos de AM usados para captar estações de radiodifusão, é de 455kHz. No passado também foram utilizados valores de 262kHz e de 465kHz.

A etapa seguinte do receptor (figura 2.16) é o detector. A sua função, é a de extrair a informação de AF do sinal de FI. Este sinal de FI é um sinal de RF que contem a mesma modulação do sinal captado pela antena do receptor; a única distinção entre eles é a frequência.

O sinal de AF que aparece na saída do detector é amplificado, pelo amplificador de AF, a um nível suficiente para excitar o altifalante do receptor.

Finalmente o altifalante converte em sons perfeitamente audíveis, aqueles fraquíssimos sinais de RF inicialmente induzidos na antena receptora.

O receptor super-heterodino representado na figura 2.16 possui ainda mais uma etapa que é o controlo automático de ganho (AGC).

A função do AGC é produzir uma tensão continua (CC) para controlar o ganho do amplificador da FI. Se por algum motivo, a intensidade do sinal captado pela antena aumentar, a tensão CC fornecida pelo ACG fará com que o ganho do amplificador da FI diminua proporcionalmente. Ao contrário, se a intensidade do sinal de RF captado pela antena diminuir, a tensão CC fornecida pelo AGC fará com que o ganho do amplificador de FI aumente na mesma proporção.

A utilização desta técnica faz com que o sinal de AF, reproduzido pelo altifalante do receptor, tenha um nível bem constante, independentemente das variações ocorridas na intensidade (ou amplitude) do sinal de RF da emissora sintonizada.

2.3.11. – Receptor de CW

O sinal de rádio telegrafia em onda contínua pura manipulada (CW) não é modulado, e desta forma, a mensagem transmitida em CW não poderá ser ouvida num receptor super-heterodino comum de AM.

Para receber este tipo de sinal é necessário incorporar uma etapa no receptor de AM. Trata-se do oscilador de frequência de batimento (BFO), que é semelhante a um oscilador local de um receptor super-heterodino de AM.

A função do BFO é gerar um sinal de RF com amplitude constante e frequência bem próxima à da FI do receptor. Na prática, costuma-se fazer com que a frequência do BFO seja 1 kHz a mais ou menos do que a FI do receptor.

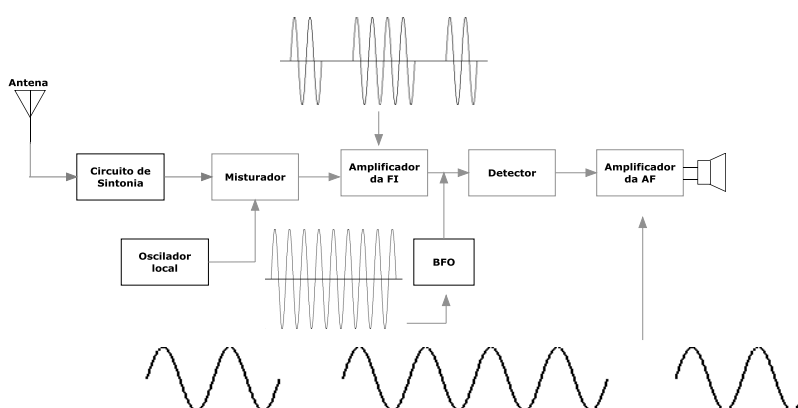


Figura 2.17: Diagrama de blocos simplificado de um receptor de CW

Na figura 2.16 é está representado o diagrama de blocos simplificado de um receptor super-heterodino de AM, equipado com um BFO e, portanto, capaz de receber e reproduzir os sinais de CW. A FI deste receptor é de 455kHz, enquanto que a frequência do BFO é de 456kHz, sendo o BFO ligado na entrada do circuito detector.

O sinal captado pela antena do receptor será um sinal de RF (7MHz, por exemplo), interrompido durante intervalos de tempo regulares, de acordo com o código morse. Após a conversão, o sinal da FI obtido (em 455kHz) também será um sinal de RF manipulado, como o sinal recebido. Por outras palavras, esse sinal de FI contém a mesma informação do sinal captado pela antena do receptor.

Na entrada do detector produz-se um batimento heterodino entre o sinal da FI e o sinal do BFO. O sinal resultante deste batimento terá uma frequência igual à diferença das anteriores $456\text{kHz} - 455\text{kHz} = 1\text{kHz}$. Portanto, o seu valor cairá na faixa das frequências audíveis (1kHz), de modo que esse sinal poderá ser ouvido no altifalante do receptor, como uma série de apitos de curta duração (*dih*) e de maior duração (*dah*).

Durante as recepções de CW, em geral o controle automático de ganho é desligado para evitar que prejudique a sensibilidade do receptor.

2.3.12. – Comunicação em banda lateral única (SSB)

O sistema de transmissão e recepção em SSB é largamente empregado nas comunicações em geral, devido às suas excelentes características, não sendo usado, porem, pelas estações de rádio difusão (*broadcasting*).

O processo de transmissão em SSB é, em última análise, uma variante do sistema de modulação de amplitude (AM-DSB).

Quando uma portadora de RF é modulada em amplitude por um sinal de AF complexo (por exemplo a voz humana), são geradas duas bandas laterais de frequências, uma para cada lado da portadora (figura 2.10).

Numa transmissão em SSB, suprimem-se (no próprio transmissor) tanto a portadora de RF como uma das faixas laterais (a superior ou inferior), transmitindo-se apenas a outra faixa lateral de frequências (a inferior ou a superior conforme o caso).

2.3.12.1. – Princípios do SSB

Considerando uma portadora nos 7000kHz modulada em amplitude por um sinal puro de AF com 3kHz.

O espectro correspondente é mostrado na figura 2.18. Como resultado temos três sinais de RF que serão irradiados pela antena do transmissor: um sinal de 6997kHz (frequência lateral inferior), um sinal de 7000kHz (frequência central) que é a própria portadora, e um sinal de 7003kHz (frequência lateral superior).

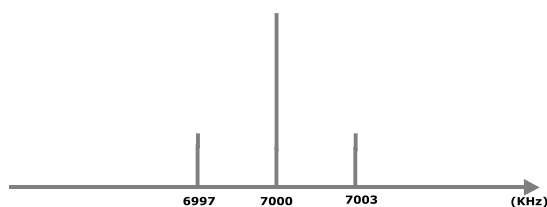


Figura 2.18: Espectro do sinal SSB

Ao tentar aumentarmos a frequência do sinal modulador para 6kHz, por exemplo, veremos que as frequências laterais também irão variar, resultando em 6994kHz e 7006kHz, respectivamente. Por outro lado, a frequência central (7000kHz) não irá alterar-se (figura 2.29).

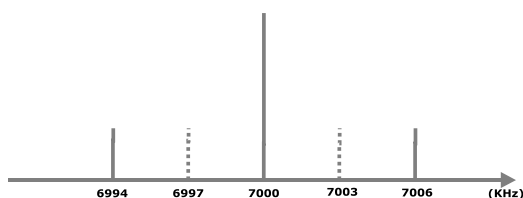


Figura 2.19: Espectro do sinal de SSB (aumento da frequência do sinal modulador)

Se ao invés de variarmos a frequência do sinal modulador, se aumentar a sua amplitude, observa-se que a amplitude dos sinais correspondentes às frequências laterais irão aumentar na mesma proporção. A amplitude da onda portadora, entretanto, não irá alterar-se (figura 2.20).

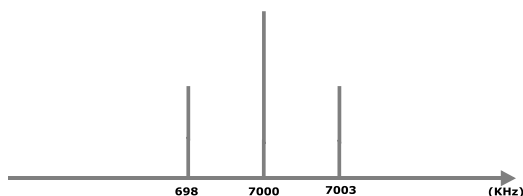


Figura 2.20: Espectro do sinal de SSB (aumento da amplitude do sinal modulador)

De tudo isto pode-se tirar duas conclusões importantes:

- 1) Como a portadora não sofre nenhuma mudança (quer em frequência, quer em amplitude) durante a modulação, fica evidente que a mensagem transmitida (sinal modulador) está presente apenas nas frequências laterais, e não na portadora.
- 2) Como a informação (ou mensagem) está contida nas frequências laterais, e são irradiadas duas frequências (a inferior e a superior) conclui-se que a informação é transmitida em duplicado.

Até aqui foi falado nas frequências laterais, na prática o que ocorre são duas bandas laterais, uma vez que o sinal modulador não é um sinal puro de AF mas sim um sinal complexo de AF (voz humana, por exemplo).

Se a portadora for eliminada juntamente com uma das bandas laterais (a superior), e enviarmos somente a outra banda lateral (a inferior), ainda assim conseguiremos transmitir toda a informação contida no sinal modulador de AF.

A figura 2.21 mostra o espectro de frequências correspondente à banda lateral inferior, apenas quando o sinal modulador é a voz humana com frequência máxima de 3kHz (tal como ocorre nas comunicações em SSB). A frequência da portadora é de 7000kHz.

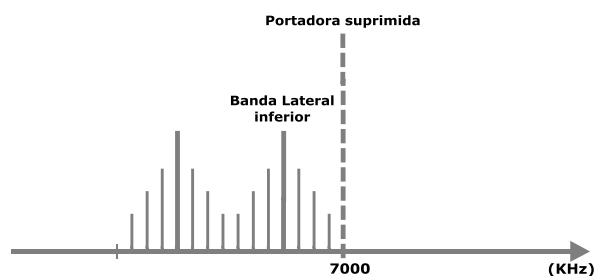


Figura 2.21: Espectro de frequências correspondente à banda lateral inferior

2.3.12.2. – Transmissor básico de SSB

Na figura 2.22 encontra-se o diagrama de blocos simplificado de um transmissor de SSB.

O sinal modulador, corresponde à mensagem que se quer transmitir, é fornecido pelo microfone e amplificado na etapa amplificadora de AF. Vamos imaginar que esse sinal modulador seja um sinal puro de AF com 2kHz, por exemplo.

A portadora para a modulação é fornecida pelo oscilador de RF. Supondo que a sua frequência seja de 7MHz.

Estes dois sinais (AF e RF) são, a seguir injectados no modulador balanceado. A função desta etapa é de misturar o sinal de AF com o sinal de RF, de modo a produzir as duas bandas laterais (como no AM), porém eliminando a portadora de RF. No exemplo, como o sinal modulador é um sinal puro de AF, e não um sinal complexo como a voz humana, serão produzidas duas frequências laterais: 6998kHz e 7002kHz, como mostra a figura 2.22.

Se o sinal obtido na saída do modulador balanceado fosse amplificado e levado à antena do transmissor, teríamos o que se chama tecnicamente de transmissão em AM-DSB SC, isto é, transmissão em AM com banda lateral dupla e portadora suprimida (Amplitude-Modulation – Double Side Band/ Supressed Carrier). Este tipo de transmissão nada mais é do que o AM sem portadora. É usado, por exemplo, na transmissão de cores no sistema de TV e no sistema de transmissão em FM estéreo – multiplex.

O próximo passo consiste em eliminar uma das faixas laterais, o que é realizado pelo filtro de banda lateral. Trata-se de um filtro (do tipo mecânico ou a cristal piezoeléctrico) bastante selectivo, que permite a passagem da banda lateral escolhida (a inferior) e atenua enormemente os sinais correspondentes à outra banda lateral (a superior).

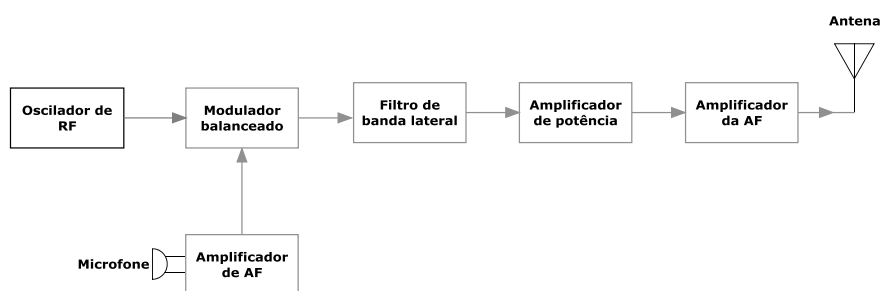


Figura 2.22: Diagrama de blocos de um transmissor SSB

Na figura 2.22, o filtro mencionado permite a passagem de uma das frequências laterais apenas (6998kHz). A outra (7002kHz) será atenuada.

Finalmente os sinais correspondentes à banda lateral que desejamos transmitir são amplificados pelo estágio amplificador final de potencia e, então, irradiados pela antena do transmissor.

2.3.12.3. – Recepção de sinais de SSB

Na figura 2.23 está representado o diagrama de blocos simplificado de um receptor de SSB, e como pode ser observado, trata-se de um receptor super-heterodino bastante parecido com aquele usado na recepção de AM (AM-DSB com portadora). A maior diferença reside no processo de desmodulação.

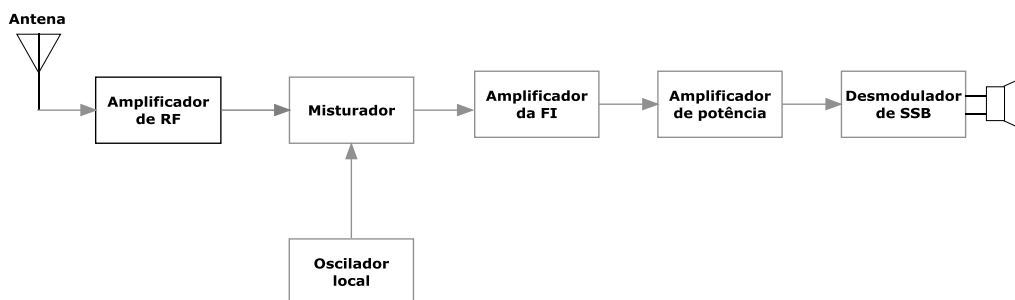


Figura 2.23: Diagrama de blocos de um receptor SSB

No receptor comum de AM (figura 2.16), a portadora e as duas faixas laterais “combinam-se” num dispositivo de características não lineares (detector), resultando o sinal modulador original (sinal de AF).

Em SSB, para recuperar a informação transmitida (sinal de AF), durante a desmodulação é necessária portadora de RF. Como ela não foi enviada pelo transmissor, essa portadora deverá ser “gerada” no próprio receptor. O circuito que gera a portadora é um oscilador de RF ou, mais precisamente, um oscilador de frequência de batimento (BFO).

O princípio de funcionamento do receptor de SSB, é o seguinte, imaginando que esteja a ser captado o sinal de 6998kHz irradiado pelo transmissor da figura 2.23.

Esse sinal de 6998kHz será amplificado pela etapa amplificadora de RF, no qual já está incluído o circuito de sintonia.

A seguir é executada a conversão. Aquele sinal de 6998kHz é “misturado” com um sinal de 7455kHz fornecido pelo oscilador local e na saída do misturador é obtido um sinal de FI na frequência diferença, ou seja, 457kHz.

Esse sinal de FI, depois de passar por um amplificador, é injectado no desmodulador de SSB, onde também é injectado um sinal de RF que fará o papel de portadora e que foi gerada pelo oscilador de frequência de batimento (BFO). O BFO está sintonizado exactamente na frequência de FI do receptor, que vale 455kHz.

No desmodulador ocorrerá um batimento entre os sinais de 457kHz e 455kHz, resultando, então, num sinal de AF com 2kHz, que nada mais é do que o sinal modulador original. Esse sinal de AF (2kHz), após passar pelo amplificador de AF, finalmente será reproduzido no altifalante do receptor e dessa forma será possível interpretar a mensagem transmitida em SSB.

2.3.13. – Vantagens do SSB sobre o AM

O sistema de comunicação SSB possui inúmeras vantagens em relação ao AM, as quais justificam a sua utilização em escala cada vez maior. Entre essas vantagens destacam-se duas mais importantes que são:

- 1) Economia de potência – A eliminação da portadora e de uma das faixas laterais possibilita uma grande economia de potência consumida pelo transmissor de SSB.

Numa transmissão comum em AM, cerca de 2/3 da potência total do transmissor são gastos para se transmitir apenas a portadora. Isto é um gasto inútil, pois a portadora não contém nenhuma informação útil (toda a informação está nas faixas laterais). Por exemplo, um transmissor de AM com 750W de potência de saída, modulado em 100% (amplitude da portadora igual à amplitude do sinal modulador), consome nada mais do que 500W apenas para transmitir a portadora. Os restantes 250W (125W para transmitir cada faixa lateral), constituem a única potência útil na transmissão.

É fácil de concluir então, que um transmissor de 125W em SSB produz o mesmo efeito que um transmissor de 750W em AM.

- 2) Largura de faixa – Para a transmissão de voz humana (radiofrequências até 3kHz), em AM é necessário um canal com 6kHz de largura, pois são transmitidas duas faixas laterais de 3kHz cada uma.

Em SSB, a transmissão da voz humana ocupa um canal com apenas 3kHz de largura, pois é transmitida apenas uma faixa lateral. Isto significa, que o SSB, para transmitir a mesma informação que o AM, utiliza, apenas metade do espaço no espectro das ondas de rádio. Portanto, o sistema de comunicação em SSB permite, em relação ao AM que o dobro das estações opere numa determinada faixa de frequências.

Tal facto torna-se importante à medida que aumenta o número de estações que se comunicam pois, devido ao progresso que ocorre em todos os ramos da vida humana, as faixas de frequências destinadas às comunicações estão cada vez mais superlotadas de emissoras [1].

2.3.14. – Modulação de Frequência (FM)

No sistema de AM, a amplitude da onda portadora modulada varia de acordo com a amplitude do sinal modulador (figura 2.6). Quando maior (dentro de certos limites) a amplitude do sinal modulador, tanto maior era a amplitude da onda portadora modulada. Por outro lado, durante a modulação, a frequência daquela portadora permanece constante (não varia).

Já no sistema de modulação em frequência (FM), podemos dizer que as coisas acontecem exactamente ao contrário. Este sistema, a amplitude da portadora de RF permanece constante durante a modulação, enquanto a sua frequência sofre deslocamentos (para mais e para menos) proporcionalmente à amplitude do sinal modulador.

Através da figura 2.22 visualiza-se isso mesmo.

Em “A” temos a forma de onda da portadora não modulada (sinal de RF); em “B” temos a forma de onda do sinal modulador (sinal de AF) e, finalmente, em “C” é possível observar a forma de onda da portadora modulada em frequência.

Observa-se que o aumento e a redução da frequência da portadora de RF depende da amplitude do sinal modulador. Durante os semi-ciclos positivos do sinal modulador ocorre um aumento na frequência da portadora de RF, enquanto que, durante os semi-ciclos negativos do sinal modulador ocorre uma diminuição na frequência da portadora de RF (figura 2.24). Por outro lado, a amplitude da portadora de RF não varia.

A “velocidade” com que a frequência da portadora de RF varia (para mais ou para menos) depende da frequência do sinal modulador: quanto maior a frequência do sinal modulador de AF, tanto mais rapidamente irá variar a frequência da portadora de RF modulada.

Se a frequência do sinal modulador for de 1kHz (1000Hz) por exemplo, então a frequência da portadora de RF modulada irá aumentar e diminuir proporcionalmente à amplitude do sinal modulador de AF, na razão de 1000 vezes por segundo. Esses “desvios” de frequência, como é visível ocorrem sempre em relação à frequência da portadora não modulada.

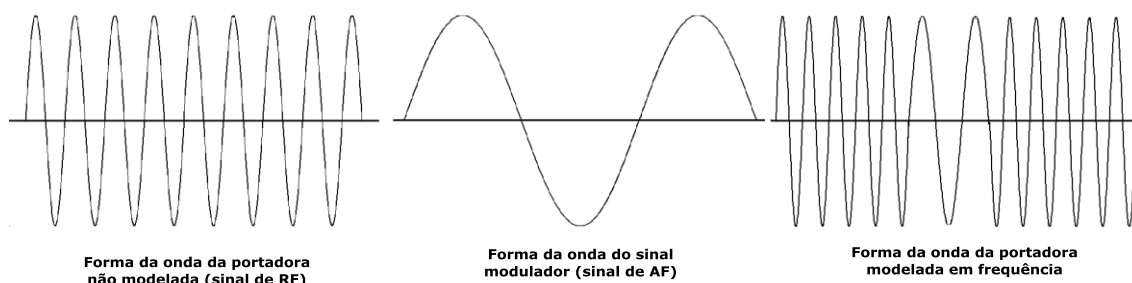


Figura 2.24: Processo de modulação em frequência (FM)

2.3.14.1. – Desvio de Frequência em FM

Imaginando uma estação de FM que trabalha na frequência de 100MHz. Esta será a frequência da portadora de RF quando não houver modulação (frequência central).

A maior variação de frequência da portadora, durante a modulação, chama-se de desvio de frequência.

Supondo que o sinal modulador seja um sinal puro de AF com 1V de pico, e que o desvio de frequência seja igual a 25kHz (ou 0.025MHz), como mostra a figura 25A. No semi-ciclo positivo, quando a amplitude do sinal modulador atingir o valor máximo (1V), a frequência da portadora

modulada atingirá o valor de 100.025MHz ($100\text{MHz} + 0.025\text{MHz}$). No semi-ciclo negativo do sinal de AF, quando a sua amplitude atingir novamente o valor máximo (1V), a frequência da portadora modulada atingirá o valor de 99.975MHz ($100 - 0.025\text{MHz}$).

Em resumo, a frequência da portadora de RF durante a modulação sofrerá um desvio de 25kHz para cima e para baixo da frequência central, com uma velocidade de variação igual à frequência do sinal modulador.

Na figura 2.25, a amplitude máxima do sinal modulador vale 2V, o que resulta num desvio de frequência igual a 50kHz.

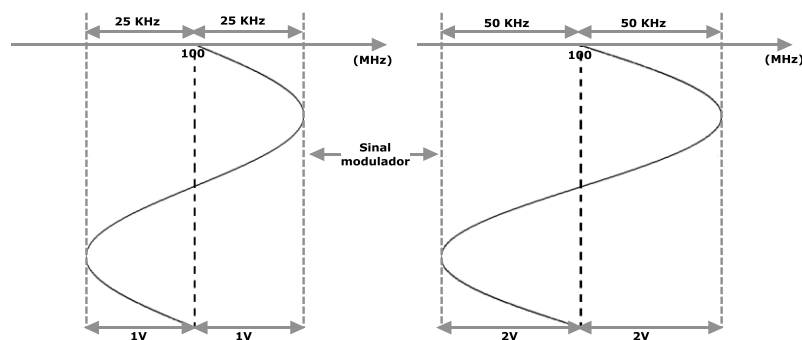


Figura 2.25: O desvio de frequência é proporcional à amplitude do sinal modulador

Nas transmissões de radiodifusão em FM, o máximo desvio de frequência é fixado por norma e vale 75kHz. Isto significa que, quando o sinal modulador atinge o seu valor máximo (no semi-ciclo positivo ou negativo), a frequência da portadora de RF terá sofrido um desvio máximo de 75kHz (para mais ou menos, conforme o caso). Portanto, a largura do canal de transmissão de FM (fixada em 0.2MHz ou 200kHz) é bem maior do que aquela da transmissão em AM (fixada em 10kHz).

É importante notar que, em AM, quem determina a largura do canal de transmissão é a máxima frequência do sinal modulador. Já em FM, quem a determina é a máxima amplitude do sinal modulador. Devido a grande largura do canal, as transmissões de FM (radiodifusão) normalmente são realizadas na faixa de VHF, entre 88MHz e 108MHz.

2.3.14.2. – Transmissor básico de FM

Na figura 2.26, está ilustrado o diagrama de blocos simplificado de um transmissor de FM.

O microfone converte as vibrações sonoras (voz humana ou música) num sinal eléctrico de baixa tensão, cujas características (frequência e forma de onda) são as mesmas das ondas sonoras de AF. Esse sinal eléctrico de baixa tensão é injectado no amplificador de AF que eleva a sua amplitude a um nível adequado para excitar o modulador de FM.

O oscilador de RF gera um sinal de alta frequência, com amplitude e frequências constantes. Esse sinal de RF, que fará o papel de portadora, também é injectado no modulador de FM. A função desse estágio modulador é fazer com que a frequência da portadora de RF varie acima e a abaixo da frequência central, da maneira vista anteriormente.

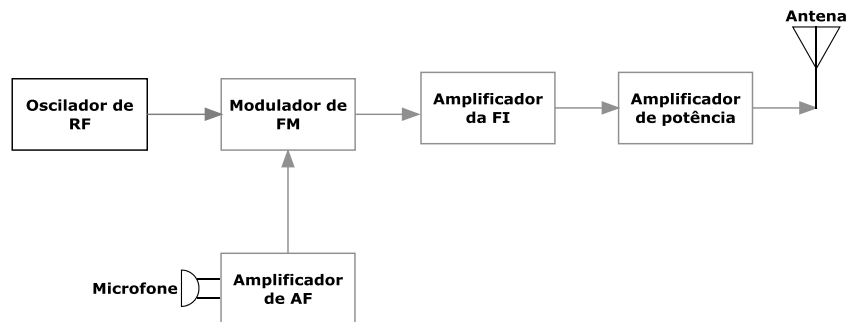


Figura 2.26: Diagrama de blocos de um transmissor de FM

Em seguida, o sinal modulado em frequência é injectado num amplificador. A função desta etapa é de amplificar adequadamente aquele sinal, de modo que ele possa excitar o amplificador final de potência.

Finalmente, a antena transforma o sinal entregue pelo amplificador final de potência, em ondas de RF, que se propagam pelo espaço.

Na figura 2.27 está representado o diagrama de blocos simplificado de um receptor para FM que também é do tipo super-heterodino.

Enquanto um receptor comum de AM normalmente não utiliza o amplificador de RF, essa etapa é indispensável para o funcionamento correcto dos receptores de FM.

No misturador, o sinal fornecido pelo amplificador de RF é “misturado” com o sinal fornecido pelo oscilador local. Desse batimento resulta um sinal de FI que contém a mesma modulação (em frequência) do sinal captado pela antena, porém numa frequência bem mais baixa e fixa. Nos receptores de FM para radiodifusão, o valor da FI é de 10.7 MHz.

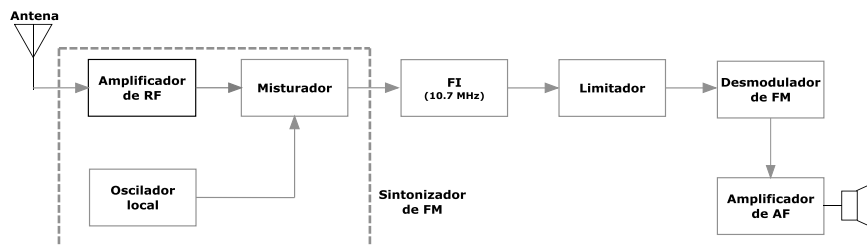


Figura 2.27: Diagrama de blocos de um receptor para FM

O sinal obtido na saída do misturador é amplificado pela etapa amplificadora da FI que, na literatura técnica, muitas vezes recebe a denominação de canal de FI.

A etapa seguinte é o limitador. Como sabemos, toda a informação transmitida está presente nas variações de frequência do sinal de FI. Entretanto, em geral esse sinal também possui variações de amplitude, normalmente causadas por interferências (naturais e artificiais) e, caso essas interferências não sejam eliminadas, elas serão ouvidas no altifalante do receptor de FM, sob a forma de ruídos desagradáveis. Assim, a função do estágio limitador é eliminar as variações de amplitude presentes no sinal de FI.

Em seguida, o sinal fornecido pela etapa limitadora (com amplitude constante e frequência variável) é injectado no desmodulador de FM, sendo que na saída desta etapa é recuperado o sinal de AF (sinal modulador) correspondente às informações enviadas pelo transmissor.

As funções executadas pelo limitador e pelo desmodulador de FM estão apresentadas esquematicamente na figura 2.26.

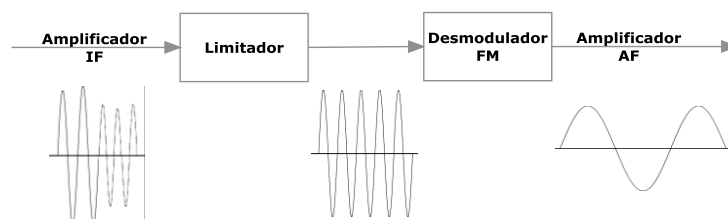


Figura 2.28: Representação dos efeitos do limitador e desmodulador de FM

Como podemos verificar, existem quase um sem fim de arquitecturas de recepção e transmissão em sistemas de rádios que diferem substancialmente na sua constituição. Por ventura para cada tipo de sistema de rádio que pretendemos implementar (rádio difusão, controle remoto, sensor sem fios, entre outros) há determinado modelo de arquitectura que se adequa mais ao projecto. No entanto, desenvolver um sistema que possa se adequar a variadas necessidades não é tarefa simples, pois ou o sistema é muito complexo, ou em alternativa alterando entre arquitecturas de rádio, levaria a que todo um conjunto de *hardware*, filtros, moduladores, desmoduladores, limitadores, entre outros tivessem que ser alterados e, isso fisicamente não é muito viável. O ideal seria termos uma arquitectura que permitisse a utilização do mesmo *hardware* implementado aos diversos sistemas. Isso pode ser conseguido através dos chamados Rádios Definidos por Software ou Software Defined Radio (SDR), onde o sistema de rádio pode ser constituído por um front-end comum a todos e depois como o próprio nome indica definido por *software*, ou seja, processos como filtros, moduladores, desmoduladores, entre outros, passam a ser realizados por *software*, passando assim qualquer alteração facilmente realizável sem recurso a alterações no hardware.

Capítulo 3

Software Defined Radio

3.1.- Introdução

As telecomunicações têm estado em constante evolução nas últimas décadas. Entre as tecnologias inovadoras, o uso de processos digitais é o mais relevante. Os sistemas digitais de comunicação têm provado a sua eficiência e trouxeram um novo elemento na cadeia de sinal de transmissão e recepção, o processador digital. Este dispositivo oferece para os novos equipamentos de rádio a flexibilidade de um sistema programável. Hoje em dia, o comportamento de um sistema de comunicação pode ser modificado alterando simplesmente o seu *software*. Isto trouxe o elevar a um novo modelo de rádio chamado Rádio Definido por Software (ou Software Defined Radio - SDR). Neste novo modelo, a tarefa de definir o comportamento do rádio foi passada exclusivamente para o *software*, deixando para o hardware apenas a implementação do front-end. Assim, o rádio não é mais estático, definido pelos seus circuitos e torna-se um elemento dinâmico, que pode mudar as suas características operacionais, como modulação, largura de banda, a taxa de codificação, mesmo modificados durante o tempo de execução de acordo com a configuração do *software*.

3.2. – O que é um SDR?

Em 1984 uma equipa na Garland Texas Division of E-Systems Inc. (agora Raytheon [1]) criou o termo “software rádio”. Este Software Radio de 1984 era um receptor digital em banda base que fornecia o cancelamento de interferência programável e desmodulação para sinais de banda larga, tipicamente com milhares de ligações com filtros adaptativos", usando múltiplos processadores de matriz acedendo a memória partilhada.

Possivelmente o primeiro rádio transceptor definido por *software* foi projectado e implementado por Peter Hoeher e Helmuth Lang no German Aerospace Research Establishment (DLR [7], anteriormente chamado de DFVLR) em Oberpfaffenhofen na Alemanha em 1988. Ambos os transmissores e receptores de um modem digital adaptativo de satélite, foram implementados de acordo com os princípios do rádio definido por software e foi proposto um periférico flexível.

O termo "*Software Defined Radio*" foi criado em 1991 por Joseph Mitola, o qual publicou o seu primeiro artigo sobre o tema em 1992. Embora o conceito tenha sido pela primeira vez

proposto em 1991, os rádios definidos por *software* tiveram as suas origens no sector da defesa desde o final dos anos 70 nos EUA e na Europa (por exemplo, Walter Tuttlebee descreveu um rádio de baixa frequência (Very low frequency - VLF) que utilizava uma ADC e um microprocessador 8085).



Figura 3.1: Microprocessador Intel 8035 [8]

O microprocessador 8085 produzido pela Intel a partir de 1970 era um microprocessador de 8 bits que necessitava apenas de uma alimentação de +5 V para funcionar. O 8085 foi também utilizado como microcontrolador devido aos seus requisitos mínimos de componentes auxiliares.

Uma das primeiras iniciativas públicas de *software* rádio foi um projecto militar americano chamado SpeakEasy. O principal objectivo deste projecto era o de usar processamento programável para simular mais de 10 rádios militares existentes, operando nas bandas de frequência entre 2 e 2000 MHz. Além disso, outro dos objectivos do projecto era poder incorporar facilmente novas normas de código e modulações no futuro, de modo a que as comunicações militares pudessem acompanhar os avanços nas técnicas de codificação e de modulação [7].

Um rádio definido por *software* (SDR) é um sistema de comunicações de rádio, onde os componentes tipicamente implementados em hardware (por exemplo, misturadores, filtros, amplificadores, moduladores/desmoduladores, detectores, etc) são implementados por meio de um *software* num computador ou em dispositivos computacionais. Joseph Mitola descreve o SDR como:

“A software radio is a radio whose channel modulation waveforms are defined in software. That is, waveforms are generated as sampled digital signals, converted from digital to analog via a wideband Digital-to-Analog Converter (DAC) and then possibly upconverted from IF to RF. The receiver, similarly, employs a wideband ADC that captures all of the channels of the software radio node. The receiver then extracts, downconverts and demodulates the channel waveform using software on a general purpose processor.” [9]

Por outras palavras, o conceito de SDR propõe que a conversão digital-para-analógico (no transmissor) e a conversão analógico-para-digital (no receptor) seja realizada tão perto quanto possível da antena.

O transceptor SDR ideal é mostrada na figura 3.2. Os filtros, misturadores, moduladores ou demoduladores e outros, são implementadas por software através de um DSP. Isto fornece um

sistema com flexibilidade porque requer apenas o *software* de comutação, a fim de adaptar o sistema a outra norma.

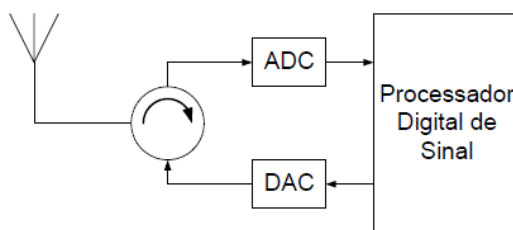


Figura 3.2: Modelo ideal de SDR [10].

No entanto, este SDR ideal, actualmente não é fisicamente realizável devido à limitação dos componentes electrónicos disponíveis.

Apesar destas limitações, um SDR não tem de ser rigorosamente ideal e não existe uma definição exacta para o quantificar. Um sistema SDR deve sim obedecer a uma ou mais das seguintes características:

- uma arquitectura de transceptor que possa ser controlada e programada por software;
- funções de rádio implementado em DSP;
- reprogramável via interface
- suporte para multi-normas e multi-modo.

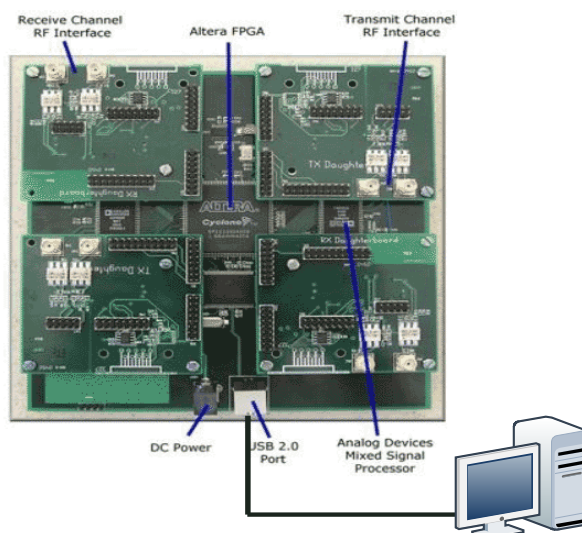


Figura 3.3: Cenário típico de um SDR [11]

Um dos sistemas comerciais SDR mais conhecidos é o *Universal Software Radio Peripheral* (USRP). O USRP é uma plataforma de SDR flexível e de baixo custo desenvolvida por Matt Ettus (Ettus Research). É constituído por um placa principal, responsável pelas funções

programáveis mais complexas onde incorpora a ADC, a DAC e uma FPGA para processamento do sinal antes de ir para o Gnu Radio. Existem ainda placas secundárias, de expansão que contêm os módulos de rádio frequência.



Figura 3.4: O Universal Software Radio Peripheral - USRP [12]

A placa principal possui quatro conversores analógicos-digitais de 12 bits, com taxa de amostragem de 64 MS/s, quatro conversores digitais analógicos de 14 bits com taxa de amostragem de 128 MS/s, quatro conversores para frequências de amostragem menores (*digital downconverters*) com taxas de decimação programáveis, dois conversores para frequências de amostragem maiores (*digital upconverters*) com taxas de interpolação programáveis e um controlador USB 2.0, implementados numa placa *Field Programmable Gate Array* (FPGA) Altera Cyclone.

O modelo mais recente, o USRP2, oferece um maior desempenho e flexibilidade. Esta última versão dispõe de conversores analógico-digitais e digitais-analógicos de maiores precisão e velocidade, permitindo o processamento de sinais de banda mais larga e aumentando a faixa dinâmica do equipamento. A placa principal do USRP2 possui dois conversores analógico-digitais de 14 bits, com taxa de amostragem de 100 MS/s, dois conversores digitais-analógicos de 16 bits, com taxa de amostragem de 400 MS/s, quatro conversores para frequências de amostragem menores (*digital downconverters*) e conversores para frequências de amostragem maiores (*digital upconverters*), com taxas de decimação e interpolação programáveis, um interface Ethernet gigabit e um interface série para expansão.



Figura 3.5: O Universal Software Radio Peripheral 2 – USRP2 [13]

3.3. – Architecturas de SDR

Como o SDR ideal representado na figura 3.2 não é possível implementar, actualmente têm de ser consideradas outras arquitecturas para a implementação de um SDR. Essas arquitecturas diferem no local onde a digitalização ocorre, portanto, podem ser considerados três tipos de configurações:

- digitalização em banda base;
- digitalização em IF;
- digitalização em RF.

3.3.1. – Digitalização em banda base

Na digitalização em banda base, o sinal sofre duas *down conversions* antes de atingir a frequência de banda de base onde está colocada a ADC, como se pode ver na figura 3.6.

Uma das vantagens desta arquitectura é o facto de utilizar componentes de banda estreita, fáceis de encontrar no mercado e de baixo consumo. No entanto a utilização de componentes de banda estreita limita a capacidade de reconfiguração do rádio e vai contra um dos objectivos dos sistemas SDR, que devem ser de banda larga. Outro problema é a quantidade de componentes necessários para a implementação desta arquitectura, tornando a integração do sistema num único chip difícil de implementar [14].

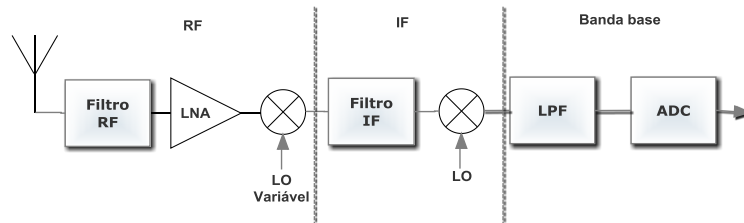


Figura 3.6: Digitalização em banda base

3.3.2. – Digitalização em IF

Nesta arquitectura, a ADC está colocada na etapa de IF. Isto permite uma maior largura de banda, quando comparada com a arquitectura anterior, tornando esta aplicação mais próxima do SDR ideal. Agora, a banda recebida pode ser mais larga, e uma vez que a digitalização é feita na IF, os filtros digitais e o processamento podem ser utilizados para a selecção de canal. Esta arquitectura permite que possam ser implementados mais normas e é apropriada para ser realizada com os componentes actualmente disponíveis. Essa é a razão por que esta arquitectura é a mais viável e de maior preferência para se implementar um sistema SDR hoje em dia. Tendo a

vantagem de o seu design poder ser mais compacto, no entanto, tem a desvantagem de o consumo de energia dos seus componentes ser maior.

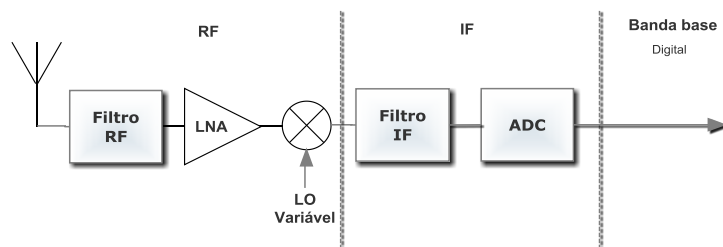


Figura 3.7: Digitalização em IF

3.3.3. – Digitalização em RF

Movendo a ADC para junto da antena, a digitalização é efectuada na etapa de RF, como se pode ver na figura 3.8. Esta é a arquitectura final da evolução dos SDR e é uma aproximação à proposta por Joseph Mitola como a arquitectura de SDR ideal.

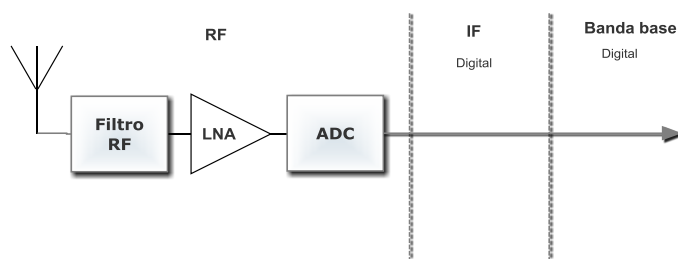


Figura 3.8: Digitalização em RF

A ADC deve ter uma gama dinâmica e taxa de amostragem elevada, de preferência com um grande número de bits de resolução. Hoje em dia, existem ADCs de elevada velocidade que podem alcançar uma taxa de amostragem alta, com um bom número de bits de resolução, mas o seu custo é muito elevado para aplicações comerciais (ver tabela 1).

Como já foi visto, o esquema ideal não é totalmente realizável devido aos limites actuais da tecnologia. O principal problema é a dificuldade de conversão entre o digital e o domínio analógico a uma taxa e precisão suficientemente elevada, ao mesmo tempo, e, sem depender de processos físicos, como a interferência e ressonância electromagnética. No entanto, é possível realizar um SDR VLF aproximado do modelo de Joseph Mitola. É o caso do SAQrx [14], um receptor USB (Upper Side Band) baseado em *software* criado pelo Johan Bodin, SM6LKM, que cobre a faixa de 0-22 kHz e funciona no sistema operativo Microsoft Windows. A largura de banda do filtro é seleccionável em três etapas de 300, 1000 e 2400 Hz.

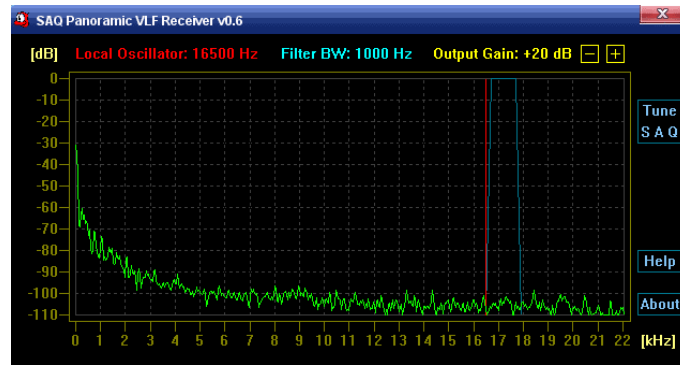


Figura 3.9: Janela de recepção do SAQ

O *software* necessita apenas de uma placa de som capaz de *full duplex* a uma taxa de amostragem de 44 kHz (normalmente presente na maioria das placas internas dos PCs) onde a antena liga directamente.

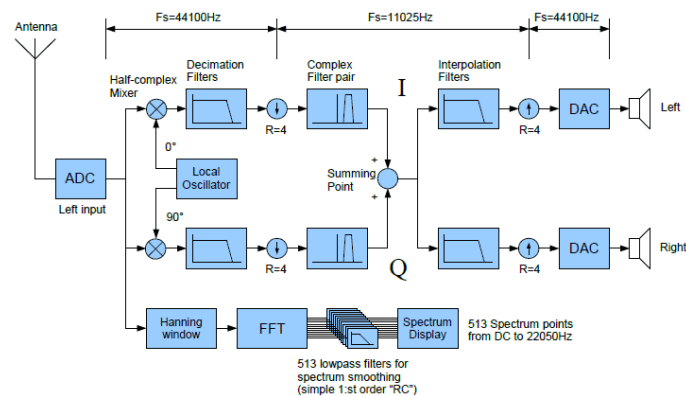


Figura 3.10: Diagrama de blocos do SAQrx [15]

3.4. – Vantagens do Software Defined Radio

Os sistemas SDR (*Software Defined Radio*) apresentam duas grandes vantagens sobre os sistemas de rádio tradicionais: a configuração dinâmica das suas características; e a performance.

Os sistemas de rádio definidos por *software*, são de um ponto de vista macroscópico similares aos sistemas de rádio tradicionais, ou seja, constituídos pelas mesmas entidades: filtros; amplificadores; mixers; etc. A grande diferença advém do facto de nos sistemas tradicionais estes blocos serem implementados em hardware, enquanto que nos SDR estes mesmos componentes são implementados em software, e logo com um maior grau de liberdade quanto às suas características intrínsecas. Os componentes físicos são desenvolvidos de acordo com os requisitos pré-estabelecidos, e que após serem fabricados oferecem um grau de liberdade, para alterações, muito reduzido (por exemplo o ganho de amplificadores), ou mesmo nulo (no caso da largura de banda de um filtro). Esta configuração dinâmica do sistema de rádio permite alterar as características do sistema de rádio em tempo real, tornando-se muito atractivo sobretudo para sistemas de rádio cognitivo, em que o conhecimento espectral é uma necessidade absoluta, e que impõe muitas vezes que o espaço de amostragem seja muito maior que o realmente necessário

para a transmissão de informação. Para além disso podem também ser necessárias várias alterações de frequência sucessivas, o que fisicamente é muito difícil de executar desde logo pela necessidade de diferentes frequências centrais para os filtros.

Em termos de performance, os ganhos variam bastante de acordo com o tipo de digitalização considerado. Para o caso mais simples e semelhante aos sistemas tradicionais (digitalização em banda base) os ganhos vêm sobretudo ao nível do tratamento final do sinal desmodulado. Os sistemas de digitalização acrescentam os ganhos referentes à última conversão do sinal para banda base em relação ao caso anterior, em que já é possível efectuar alguns tratamentos aos sinais, por exemplo, para eliminar possíveis sinais adjacentes, ou mesmo frequências dentro da banda passante. No caso de digitalizações em RF os ganhos são ainda mais acentuados pelo facto de se usarem ADC's com um grande número de bits para quantificação obtendo-se uma gama dinâmica considerável para os sinais à entrada, por outro lado, como os níveis de alimentação são bastante reduzidos (tipicamente 1.8 a 2.5V) com esse grande número de bits para quantificar os níveis intermédios, o nível de ruído destes componentes é muito baixo, permitindo a captação de sinais muito fracos. É também importante levar em conta que quanto mais do sistema for executado no domínio digital, menor será o efeito das desadaptações, por mínimas que sejam, entre componentes, uma vez que nesse domínio tal problemática não se coloca.

Por outro lado, existem componentes que fisicamente são muito difíceis de obter, como é o caso de filtros com grandes factores de qualidade (Q) caracterizados por baixas larguras de banda passante, fortes atenuações fora dessa banda, e elevada frequência central de operação. Em termos matemáticos, estas funções são muito simples de processar para as unidades de processamento a que estamos habituados a encontrar nos dias que correm.

Para além da sensibilidade e selectividade, já referenciados anteriormente, existem outros parâmetros que permitem caracterizar os sistemas de rádios. Entre eles temos o nível de ruído e a gama dinâmica.

O nível de ruído é o nível de ruído à entrada de um sistema receptor de rádio, constituído por duas componentes: ruído térmico e sinais indesejados/interferências. O ruído térmico é consequência da temperatura de funcionamento do sistema (temperatura ambiente) e da largura de banda à entrada do receptor. Este nível é o mínimo valor de ruído no sistema, ou seja, a partir deste valor todas as operações que se façam no receptor apenas contribuirão para danificar este valor, por isso é importante garantir que essa degradação seja o menor possível. Os sinais indesejados à entrada de receptor, designados por interferências, são todos os sinais indesejados recebidos pelo sistema.

A gama dinâmica de um receptor é um dos seus parâmetros mais importantes para descrever a qualidade de um receptor, e é um factor que descreve a capacidade que este tem de detectar sinais fracos na presença de sinais fortes, por outras palavras, representa a quantidade de potência que um sinal fraco pode estar abaixo de um sinal forte, para que esse sinal possa ser

descodificado – assumindo que esse sinal fraco se encontra acima do nível de ruído característico do receptor.

A gama dinâmica é característica geralmente imposta pela primeira unidade de ganho no sistema. Este componente é habitualmente um pré-amplificador que é comum aos sistemas tradicionais, e aos sistemas SDR sem digitalização em RF. Quando os sinais à entrada deste bloco são muito fortes, levam à saturação dos mesmos, o que inutiliza a recepção de sinais.

No caso de sistemas digitais, como é o caso de SDR com digitalização em RF, esse valor é dependente do número de bits de quantificação da ADC.

Device Under test	Noise Floor (dBm)	AGC Thrshld (μV)	Sensibility (μV)	LO Noise (dBc/Hz)	Spacing KHz	Front End Selectivity	Filter Ultimate (dB)	Dynamic Range Narrow Spaced (dB)	KHz	Price (USD)
Hiperling PT-8000A	-128 -141 ^b	5.4 1.0 ^b	0.45 0.11 ^b	136 147	10 50	A Trk Presel	100	105W	2	
Elecraft KX3	-123 -138 ^{b2}	12 1.3 ^{b2}	0.9 0.09 ^{b2}	144	10	B Band Pass	110	104 ^t 96 ^u 65 ^v	2	999.95
Yaesu FTdx-5000D	-123 -135 ^b -141 ^{b1}	4.6 1.2 ^b 0.33 ^{b1}	1.1 0.27 ^b 0.13 ^{b1}	135	10	B Band Pass	90 ^f	101 ^f	2	5399.95
Elecraft K3	-130 -138 ^b	2.1 0.6 ^b	0.33 0.19 ^b	138	10	B Band Pass	105	101 ^f 96 ^{af} 95 ^f	2	2249.49
Perseus	-123 -125b	0.15 0.1 ^b	0.8 0.6 ^b	147	10	B Band Pass	109 ^f	99	2	999.95
FlexRadio FLEX-5000A	-123 -135 ^b	2.0 0.5 ^b	1.3 0.3b	123	10	B Band Pass	98	96	2	2799
Tem-Tec Orion II	-125 -133 ^b	2.7 0.65 ^b	0.75 0.3 ^b	126	10	B Band Pass	100 ^f	95 ^f	2	4395
Tem-Tec Orion	-127 -135 ^b	0.8	0.6 0.25 ^b	130	10	B Band Pass	100 ^f	93	2	-
Tem-Tec Eagle	-124 -132 ^b	2.5 0.6 ^b	0.7 0.3 ^b	131	10	B Band Pass	90 ^f	90 ^f	2	1819
FlexRadio FLEX-3000	-123 -139 ^b	2.1 0.13 ^b	1.35 0.16 ^b	120	10	B Band Pass	90 ^f	90 ^f	2	1699

Tabela 3.1: Análise de receptores de rádio [16]

Dos vários receptores apresentados na tabela, podemos facilmente verificar que as soluções de SDR actuais estão a par das soluções tradicionais com performances equivalentes ou superiores mas a uma fracção do preço. Tomando como exemplo o FlexRadio FLEX-3000, um SDR que converte o RF para a gama de frequências de 0 a 192KHz (típica de uma placa de som de uma gama média) verificamos que a sua sensibilidade é ligeiramente superior à do Yaesu Ftdx-5000D que apresenta um preço sensivelmente 3 vezes superior, mas, em contraponto, este último tem cerca de 10dB a mais na gama dinâmica. No entanto, se adicionarmos um pequeno receptor como o Elecraft KX3 à comparação, facilmente verificamos que este SDR que usa desmoduladores I/Q de alta performance para obter os dois sinais (em fase e quadratura), que são depois processados pelo seu DSP, verificamos que se consegue obter um receptor muito mais económico, com melhor performance (mais sensibilidade, maior gama dinâmica) por um valor mais de 5 vezes inferior, quando comparado ao do FTdx-5000D e cerca de 20 vezes inferior que o do PT-8000A.

3.5. – ADCs

A ADC é um dos componentes mais importantes na arquitectura de um SDR. A sua selecção é crucial, mas escolher uma ADC adequada para uma determinada aplicação nem sempre é uma tarefa fácil, considerando os milhares de conversores existentes actualmente no mercado. A melhor abordagem será ir directo para os guias de selecção e motores de busca, disponíveis no site dos fabricantes. Através da pesquisa pela taxa de amostragem, resolução, tensão de alimentação e outras propriedades importantes, é possível seleccionar a ADC mais adequada às nossas necessidades. Mas geralmente não é suficiente, pois existe uma multiplicidade de aparentes boas escolhas. A melhor maneira de lidar com tanta oferta é ter bem presente os parâmetros, característica, tipos de ADC e qual o seu destino.

Actualmente, a maioria das aplicações das ADCs, podem ser classificadas em quatro grandes segmentos de mercado: (a) aquisição de dados, (b) medição de precisão industrial, (c) voz e áudio, e (d) “alta velocidade” (implicando taxas de amostragem superiores a 5 MSPS). Uma percentagem muito grande dessas aplicações podem ser resolvidas por aproximação sucessiva (SAR), sigma-delta ($\Sigma\Delta$) e ADCs pipelined. Uma compreensão básica destes quatro grandes segmentos de mercado, as três arquitecturas mais populares de ADC, e sua relação com os segmentos de mercado, é um complemento útil para os guias de selecção e motores de busca dos fabricantes.

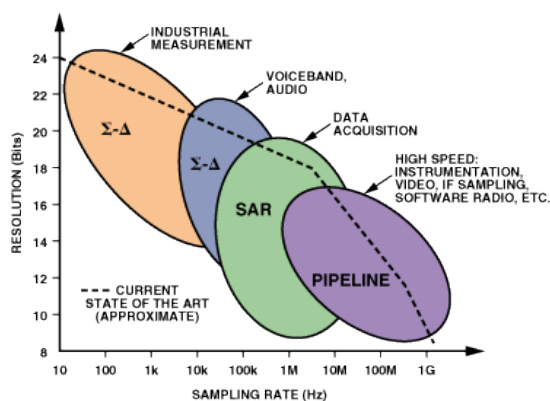


Figura 3.11: Arquitecturas de ADC, aplicações, resolução e frequências de amostragem [17]

A classificação na figura 3.11 mostra de uma maneira geral como estes segmentos de aplicação e as arquitecturas típicas associadas relativamente à resolução da ADC (eixo vertical) e taxa de amostragem (eixo horizontal). As linhas a tracejado representam o estado da arte aproximado em meados de 2005. Mesmo que as várias arquitecturas tenham especificações semelhantes, as próprias aplicações são a chave para escolher a arquitectura específica necessária. [17]

Referência	Resolução	Taxa	Largura de Banda	Consumo	Preço
Texas ADC12D1800RF	12 bits	3.6 GSPS	2.7 GHz	4.7W	995.20 USD
Texas ADS54RF-63-ADX4	12 bits	2.2 GSPS	2.3 GHz	2.25W	2499 USD
Maxim MAX108	8 bits	1.5 GSPS	2.2 GHz	2.7W	55 USD
Texas ADS831	8 bits	80 MSPS	300 MHz	310mW	3.95 USD

Tabela 3.2: Comparação das características de diferentes ADCs

Capítulo 4

Protocolos

Seguidamente pode ser consultado um resumo das características dos protocolos mais importantes, na área em estudo.

4.1. – Voice over IP

Voz sobre IP, ou *VoIP* (Voice over Internet Protocol) é o protocolo de encaminhamento de chamadas que usa a Internet ou qualquer outra rede de computadores baseada no Protocolo de Internet, tornando a transmissão de voz mais um dos serviços suportados pela rede de dados.

Uma das motivações principal para a sua criação foi a redução de custo devido ao uso de uma única rede para carregar dados e voz, especialmente quando os utilizadores já possuem uma rede com capacidade subutilizada, que pode transportar dados *VoIP* sem custo adicional. As chamadas de *VoIP* para *VoIP* em geral são gratuitas, enquanto chamadas *VoIP* para redes fixas (PSTN) ou redes móveis podem ter custo para o utilizador *VoIP*.

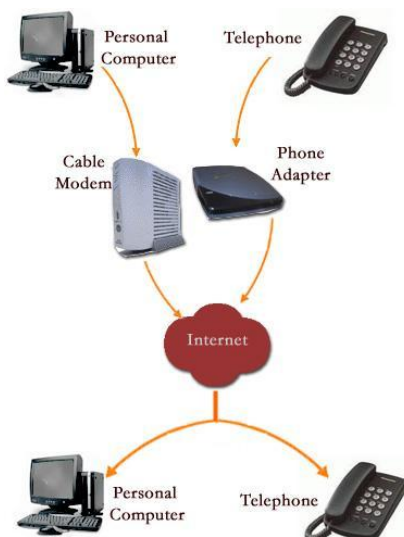


Figura 4.1: Visão geral do funcionamento do VoIP [18]

O *VoIP* pode facilitar as tarefas mais difíceis nas redes tradicionais. As chamadas a receber podem ser automaticamente encaminhadas para o telefone *VoIP*, independentemente da localização na rede. Por exemplo, é possível levar um telefone *VoIP* para uma viagem, e ligando-o à Internet pode-se receber as chamadas, contanto que a ligação seja rápida e estável o suficiente.

O facto de a tecnologia estar associada à Internet traz também a vantagem de poder integrar telefones *VoIP* a outros serviços como conversação de vídeo, mensagens instantâneas, partilha de arquivos e gestão de listas telefónicas. Estar ligado à Internet também significa que o custo da chamada é independente da localização geodésica e dos horários de utilização, ambos os parâmetros usados na cobrança na rede fixa e móvel, e cujos valores variam de operadora a operadora.

Existem vários pacotes de serviço *VoIP* que incluem funcionalidades em que as redes tradicionais sejam cobradas à parte, como conferência a três, redireccionamento de chamadas, re-ligação automática e identificador de chamadas.

Entretanto, apesar de amplamente utilizado através de computadores, o *VoIP* pode ser utilizado através de adaptadores para telefones analógicos ou *gateways VoIP*, que são aparelhos que podem ser ligados directamente numa ligação de banda larga e a um aparelho telefónico comum ou a um *PABX* em posições de troncos ou ramais. Eles fornecem a interligação entre as redes IP e fixas.

O funcionamento do *VoIP* consiste em digitalizar a voz em pacotes de dados para que sejam transferidos pela rede IP e sejam convertidos novamente em voz no seu destino. Vejamos um exemplo, passo a passo, da utilização de uma ligação. O utilizador levanta o auscultador do telefone IP da base, e nesse momento é emitido um sinal para a aplicação sinalizadora do *router* de "auscultador levantado". A parte de aplicação emite um sinal de marcação. O utilizador digita o número de destino, cujos dígitos são acumulados e armazenados pela aplicação da sessão. Os *gateways* comparam os dígitos acumulados com os números programados; quando há uma coincidência ele mapeia o endereço marcado com o IP do *gateway* de destino. A aplicação de sessão corre o protocolo de sessão sobre o IP, para estabelecer um canal de transmissão e recepção para cada direcção através da rede IP. Se a ligação estiver sendo realizada por um *PABX*, o *gateway* troca a sinalização analógica digital com o *PABX*, informando o estado da ligação. Se o número de destino atender a ligação, é estabelecido um fluxo *RTP* sobre *UDP* entre o *gateway* de origem e destino, tornando a conversação possível. Quando qualquer das extremidades da chamada desligar, a sessão é encerrada [19,20].

4.2. – Radio over ip

O rádio sobre o protocolo de Internet, ou *RoIP*, é semelhante ao *VoIP*, mas aumenta as comunicações de rádio para mais do que chamadas telefónicas. Do ponto de vista do sistema, é essencialmente *VoIP* com *PTT* (Push To Talk). Para o utilizador pode ser implementado como qualquer outra rede de rádio. Com o *RoIP*, pelo menos, um nó de uma rede de rádio é um rádio (ou um rádio com um dispositivo de interface de IP) ligado através de IP, para outros nós na rede de rádios. Os outros nós podem ser rádios, mas pode ser também enviado por consolas

tradicionais (hardware) ou modems (software num PC), telefones, aplicações como o Skype a correr num computador, *PDA*, *smartphone*, ou outro dispositivo de comunicações acessível por IP. O *RoIP* pode ser implantado através de redes privadas, assim como pela Internet. É muito útil em sistemas móveis terrestres de rádio, utilizados pelos departamentos de segurança pública e frotas de utilitários espalhados por uma grande área geográfica. Como em outros sistemas de rádio centralizados, tais como sistemas de rádio trunking, os problemas de atraso ou latência e dependência de uma infra-estrutura centralizada, podem ser impedimentos para a adopção por órgãos de segurança pública.

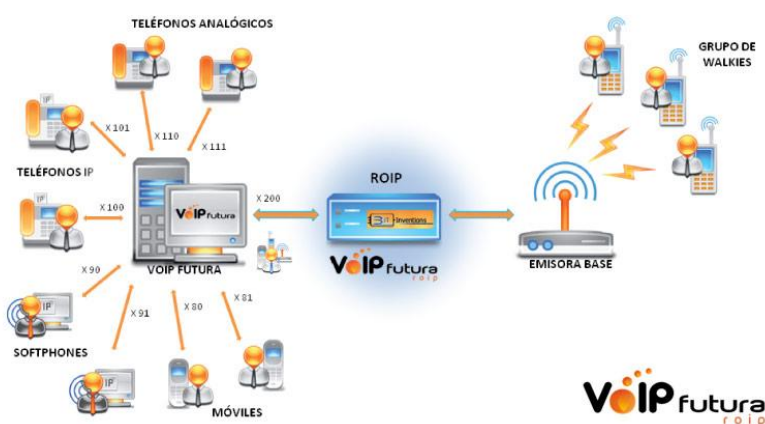


Figura 4.2: Exemplo de uma rede RoIP [21]

O *RoIP* não é um protocolo proprietário ou um protocolo limitadamente construído, mas sim um conceito básico que foi implementado de várias formas. Junto da comunidade de radioamadores foram implementados vários sistemas como o AllStar Link, IRLP e o EchoLink (figura 5.2) que demonstraram a utilidade do *RoIP* num ambiente parcialmente ou totalmente open-source.

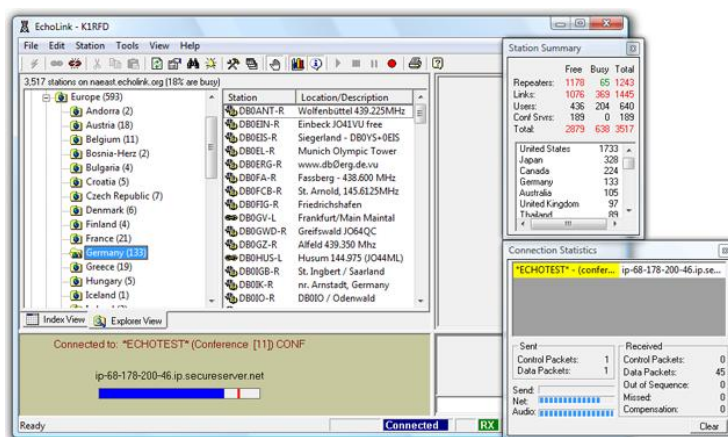


Figura 4.3: Janela do programa Echolink [22]

Muitos fabricantes de equipamentos de rádio como a Motorola e a Harris também adoptaram o RoIP como parte dos seus projectos de sistemas de rádio.

A motivação para implantar a tecnologia RoIP, é geralmente guiada por um de três factores: primeiro, a necessidade para abranger grandes áreas geográficas; segundo, o desejo de proporcionar ligações mais fiáveis, ou, pelo menos, ligações mais facilmente, reparáveis em sistemas de rádio; e terceiro, para apoiar o uso de muitas estações base, isto é, comunicações de voz de utilizadores fixos, em vez de rádios móveis ou portáteis.

No nosso país o *RoIP* está implementado essencialmente por radioamadores. Existe actualmente uma rede de repetidores Echolink que cobre o país de Norte a Sul e as ilhas da Madeira e dos Açores.

Em Portugal, e apesar de não se encontrar regulamentado o uso do Echolink, a ANACOM autoriza a sua utilização, em carácter experimental, permitindo exclusivamente às associações de radioamadores a colocação de repetidores de UHF para que a comunidade de radioamadorística possa usufruir deste modo de comunicação. [23] Existem actualmente duas conferências distintas, a Lusa-USA e a Lusófona cada uma com a sua rede montada no território nacional e com ligação para diversos locais do mundo junto de comunidades de língua portuguesa.

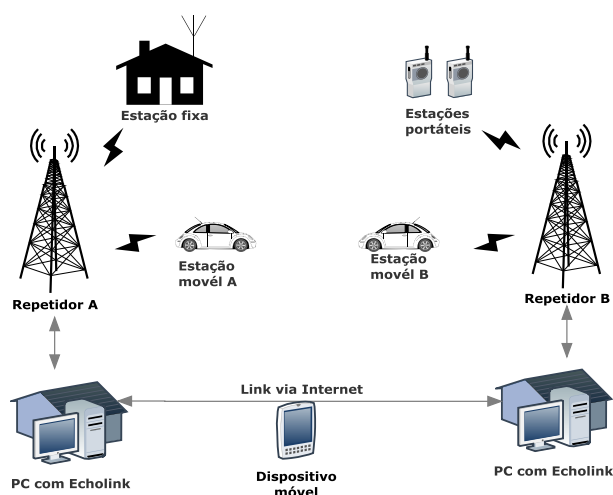


Figura 4.4: Diagrama de uma rede de Echolink

4.3. – Streaming

O *streaming* é uma forma de transmissão de som e imagem (áudio e vídeo) através de uma rede qualquer de computadores sem a necessidade de efectuar o *download* prévio do que se está a ver e/ou ouvir, pois o computador recebe as informações ao mesmo tempo que as repassa ao utilizador.

O nome *streaming* deriva da palavra *stream* que significa pacotes. O *stream* pode ser definido como um fluxo de dados num sistema computacional. Quando um ficheiro é aberto para edição, todo ele ou parte dele fica na memória, permitindo assim alterações, por isto apenas quando é fechado, se tem a garantia de que nenhum dado se perderá ou será danificado. Quando

um ficheiro é carregado na memória para ser editado, esta carga ocorre num fluxo "*stream*", ou seja, linha a linha até o carregamento total do ficheiro, como água a correr num cano ou bytes a ser lidos por um programa.



Figura 4.5: Funcionamento da distribuição do streaming [24]

Este armazenamento em *buffer* ocorre sempre que a transmissão é iniciada ou quando a mesma é interrompida.

O *streaming* surgiu na Internet em 1985 e a primeira tecnologia a tornar-se popular foi o Real Audio da Progressive Networks (actual Real Networks) e funcionava apenas com áudio.

Nas suas características iniciais os sons transmitidos eram mono e não possuíam uma qualidade muito fiel ao arquivo original dada a baixa taxa de frequência, processo de compactação e da pequena taxa de largura de banda, porém, mesmo com estes contratempos, a tecnologia foi prontamente aceite devido ao facto de dispensar os *downloads* longos que os utilizadores tinham que enfrentar naquela época.

Com o surgimento de novas versões do Real Player a qualidade das transmissões foi gradualmente melhorando até hoje em dia a qualidade, em muitos casos, é idêntica à qualidade de áudio de um CD.

O passo seguinte na evolução do *streaming* foi a transmissão de fluxos de áudio ao vivo através da rede, e isso foi realizado a 4 de Janeiro de 1996 com o Live @nd In Concert, onde foram apresentados nomes artísticos como Joey Ramone (dos Ramones), Joan Jett (Blackhearts) e Deborah Harry (Blondie).

Devido a todo este sucesso da tecnologia na época, surgiram diversos programas como o IBM Bamba, Streamworks, Destiny, VDO, entre outros.

Com o desenvolvimento da transmissão de som bastante adiantada e apresentando bons resultados, deu-se o início às pesquisas para que as imagens também pudessem ser transmitidas, com o desafio do volume de informações (banda passante) de um vídeo ser muito maior do que um fluxo de áudio e, em 1997, a Progressive Networks apresentou o Real Vídeo. A primeira transmissão que há registo é de um evento desportivo: um jogo de futebol americano entre os Cleveland Indians e os Seattle Mariners, a 9 de Abril de 1997.

Todo este sucesso do *streaming* finalmente despertou a atenção da Microsoft, que a princípio fez um acordo de acções com a Progressive Networks para o desenvolvimento do Real Player para o seu *browser* Internet Explorer, porém isso foi apenas para que a empresa desenvolvesse o seu próprio software player para Streaming - o Netshow - que depois foi substituído pelo conhecido Windows Media Player. [25]

Hoje em dia, grande parte dos formatos e conteúdos de multimédia disponível na internet giram em torno do *streaming*. Existem inúmeros exemplos disso, MP3, Podcasts, Peer-To-Peer, Flash Vídeo, YouTube, entre outros.

Com este rápido crescendo, primeiro da internet em si e posteriormente do *streaming*, as rádios tiveram de se adaptar ao novo panorama, mas ao contrário da maioria dos outros meios de comunicação tradicionais, mais concretamente dos escritos, foram aqueles que melhor se souberam adaptar e muito em parte graças ao *streaming*, pois a rádio passou a ter um conteúdo mais de multimédia e interactivo para com o ouvinte. Para além da emissão *online* em directo na internet, passaram a estar disponíveis os conteúdos transmitidos, coisa que com o modelo tradicional de rádio não era possível, só mesmo em caso de repetição da emissão.

Capítulo 5

Implementação do sistema SDR

Durante esta dissertação de Mestrado, procurou-se para além do estudo dos sistemas de rádio actuais, o desenvolvimento de um sistema de recepção de rádio com recurso à tecnologia de *Software Defined Radio* (SDR), que permitisse efectuar a escuta e sintonia de uma gama de frequências por múltiplos utilizadores, simultaneamente e remotamente através da internet.

Nesse âmbito, primeiramente pretendeu-se o desenvolvimento de um *front-end* para um SDR que permitisse a elaboração do projecto proposto pela dissertação. Para isso foi efectuada uma pesquisa pelos fabricantes de componentes de RF e após uma análise exaustiva e ponderação das características de vários chips receptores e desmoduladores, a escolha recaiu sobre o CMX992 da CML Microcircuits [26].

5.1 – Escolha do chip de recepção

O CMX992 contém num único chip um receptor de elevado desempenho que permite a recepção de sistemas de rádio analógico e digital. Opera a partir de 100MHz a 1GHz e a sua arquitectura I / Q suporta múltiplos tipos de modulação e larguras de banda.

O CMX992 integra o primeiro misturador, os desmoduladores para recepção, PLL para a IF, e subsistemas de VCO e FI que minimizem os circuitos externos necessários para implementar um receptor completo.

A entrada da recepção inclui um primeiro misturador integrado com duas saídas que permite suportar duas escolhas de filtros externos para a primeira IF, depois um Multiplexer integrado de 2:1 seguido de um amplificador de ganho variável (VGA) e suporte de medição do sinal de banda larga para permitir a implementação de AGC.

O sinal da primeira FI é depois dividida nas componentes I/Q (fase e quadratura) e convertido para a banda base ou para uma FI de frequência mais baixa.

O CMX992 oferece saídas de recepção diferenciais ou single-ended e amplificadores diferenciais para acondicionamento de sinal flexível.

O CMX992 inclui o núcleo de RF e funções da F de um receptor de elevado desempenho. Pode ser utilizado numa grande variedade de produtos de banda estreita, de banda larga e aplicações sem fios, incluindo sistema multi-modo analógicos e digitais.

O CMX992 pode ser utilizado onde as modulações altamente lineares estão a ser usadas, como por exemplo, nas aplicações como o TETRA.

Algumas das principais características que tornam este chip receptor interessante são:

- Receptor de RF com elevado desempenho (100MHz a 1GHz)
- Misturador com saída seleccionável
- Primeira FI configurável
- Amplificador de ganho variável na primeira FI
- Indicador do nível de sinal na primeira FI
- Dois modos de desmodulação
- Duas saídas de FI configuráveis (450KHz ou 455KHz)
- Sintetizador do relógio da FI
- Amplificador do oscilador controlado por tensão inversa (um aumento da tensão representa uma diminuição da frequência de oscilação)
- Baixo consumo e tensão de alimentação de 3.3 V

5.2 – Placa de desenvolvimento EV9920B

Desenvolvida pela CML a placa EV9920 simplifica os testes e a avaliação do chip CMX992. Este kit implementa o circuito básico para o funcionamento do chip CMX992, e ainda permite ter ao dispor do utilizador pinos de teste para verificar o funcionamento. Esta placa é partilhada também com o CMX991 (chip que em conjunto com o CMX992 formam um par receptor/emissor).

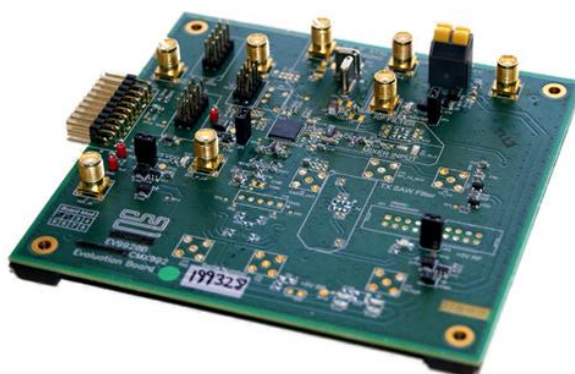


Figura 5.1: Placa de desenvolvimento EV9920

A placa EV9920 permite o acesso a diversos sinais como os de banda base e sinais de controlo através de fichas ou pontos de teste. Estão disponíveis pontos de teste para permitir a ligação de equipamentos de teste comuns, como geradores de sinais de RF e de banda base e analisadores de espectro.

Algumas das principais características da placa de desenvolvimento EV9920B são:

- Permite o explorar na totalidade as características do CMX992;
- Suporta uma gama de frequências de 100 MHz a 1 GHz (pode funcionar em frequências inferiores a 100 MHz mediante algumas alterações);
- Configurada de origem para as frequências de 450 a 470 MHz;
- Inclui CMX992, LNA, saídas de I/Q e FI, selecção de filtros da FI e pontos de teste;

- Inclui interface para ligação a PC.

5.3 – Placa de interface PE0002

A placa PE0002 é um sistema de interface para uso com a placa de desenvolvimento EV9920B que permite a ligação ao computador e simplifica muito a abordagem ao desenvolvimento do projecto.

Baseado no microprocessador da Hyperstone E2 32-bit RISC/DSP, e usando um interface de utilização gráfico, a informação gerada é formatada, marcada temporalmente e entregue ao circuito de destino através de um bus em série C-BUS da Evkit. O *software* de controlo fornecido pode ser usado para executar operações de leitura e escrita C-BUS ou para executar funções de script.

A comunicação da PE0002 com o PC é feita através de uma porta USB.

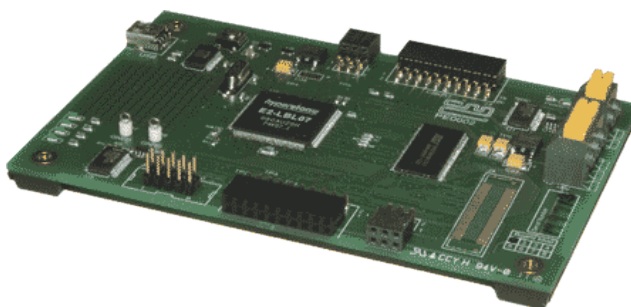


Figura 5.2: Placa de interface PE0002

Algumas das suas principais características são:

- Permite o interface com vários chips da CML incluindo para além do CMX992, o CMX991 (emissor);
- Operações de leitura e escrita de dados C-BUS do circuito de destino;
- Operação baseada num microprocessador de arquitectura 32-bit RISC/DSP;
- Interface gráfico do utilizador e *hardware* fornecidos;
- Execução em tempo real de instruções;
- Controlo e comunicação com o computador via porta USB;
- Linhas de GPIO configuráveis por *software* e bancos de LED indicadores.

5.4 – Instalação e configuração do software da placa PE0002

Antes de iniciar a configuração do sistema é necessário fazer o *download* do ficheiro ES000243.zip [26] do site da CML. Após o *download*, o arquivo deve ser descompactado. A pasta contém o programa executável que não requer instalação, basta correr o executável ES000243 e

o driver para a comunicação da placa via USB com o PC, de notar que o programa corre apenas sobre o sistema operativo Windows (XP, Vista e Seven) mas antes disso devem ser executados os seguintes procedimentos:

- A placa PE0002 deve ser ligada à EV9920B através do conector J3 (C-BUS2) ou J5 (C-BUS1), é recomendado o uso do C-BUS 1 para a completa funcionalidade do *software* (nota do fabricante);
- A placa PE0002 deve ser alimentada com 5V;
- A placa EV9920B deve ser alimentada com 7.2V;
- Deve ser ligado um cabo USB do conector J2 da PE0002 ao PC;
- Ligando a alimentação da PE0002 o led D6 deve acender;
- Deve ser instalado o driver (encontra-se dentro do arquivo ES000243.zip) quando pedido.

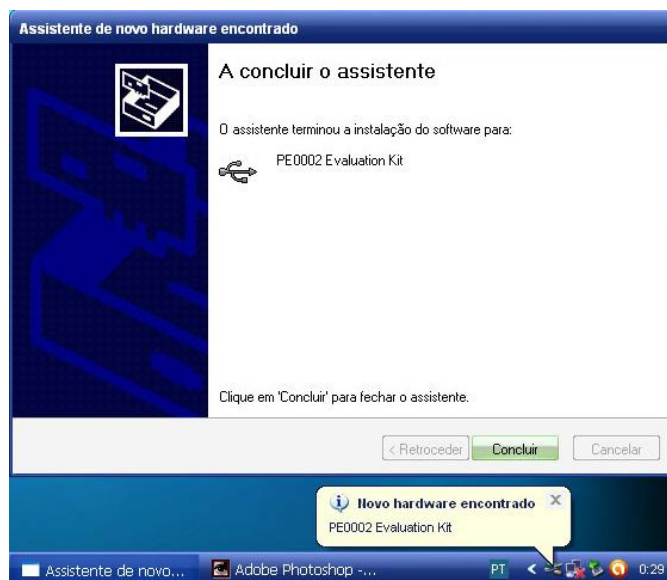


Figura 5.3: Instalação do driver da placa PE0002

Após os procedimentos indicados, o conjunto PE0002/EV9920B encontra-se ligado e devidamente pronto para a configuração, para tal deve ser executado o ficheiro ES000243.exe.

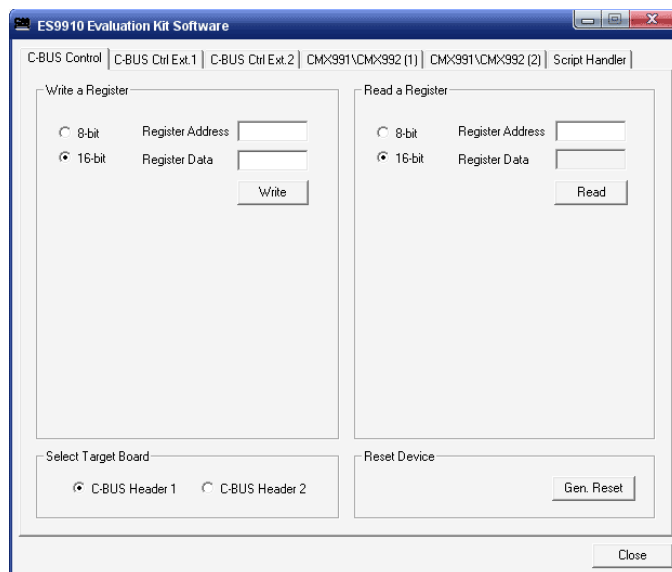


Figura 5.4: Janela do programa ES000243

No cimo da janela é apresentado, no formato de tabs os diversos menus de configuração do programa.

Neste primeiro menu (C-BUS control) encontra-se a configuração do C-BUS, que deve ser seleccionada no C-BUS Header 1 pelas razões já enunciadas anteriormente.

Nas tabs CMX991/CMX992(1) e CMX991/CMX992(1) encontram-se as configurações do CMX992 e do CMX991.

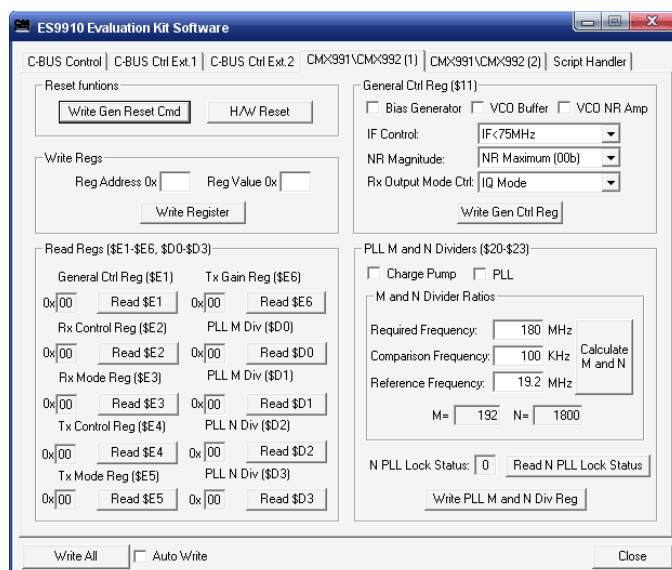


Figura 5.5: Janela de configuração dos parâmetros do CMX991/992

A CML no datasheet do kit [27] define um procedimento padrão que permite configurar o sistema para uma recepção na frequência dos 460 MHz.

Para comprovar o funcionamento correcto do sistema e efectuar os testes foram utilizados os seguintes instrumentos:

- Gerador de sinais Wiltron Model 6769B
- Gerador de sinais HP E4433B
- Fonte de alimentação PL320QMT

Seguindo as notas do fabricante procedi do seguinte modo:

- Na SMA J6 (RX_LO input) foi introduzido com o gerador Wiltron um sinal de 1010 MHz com -10dBm;
- Na SMA J9 (RXIN1) foi introduzido com o gerador HP E4433B um sinal de 460.005 MHz CW com -60dBm;
- No menu “General Control Register” foram seleccionadas as opções:
 1. IF<75MHz
 2. NR Minimum
 3. I/Q mode
 4. Activada a opção Bias generator
 5. Activada o VCO Buffer
 6. Activada o VCO NR Amp
- No menu “RX Control” foram seleccionadas as opções:
 1. LO/2 mode
 2. RX 1st mixer
 3. IF Amp/VGA, I/Q Mixers e B/B Differential AMps
 4. LNA Control Signal
- Para um ganho máximo devem ser seleccionadas no menu “RX Mode” as opções:
 1. I/Q Filter BW = 100KHz
 2. MIXOUT1 and IFIN1
- No menu “PLL M and N dividers register” devem ser seleccionadas as opções:
 1. Activada o charge pump
 2. Activado o PLL
 3. Required frequency=180MHz
 4. Comp frequency=100MHz
 5. Ref frequency=19.2MHz

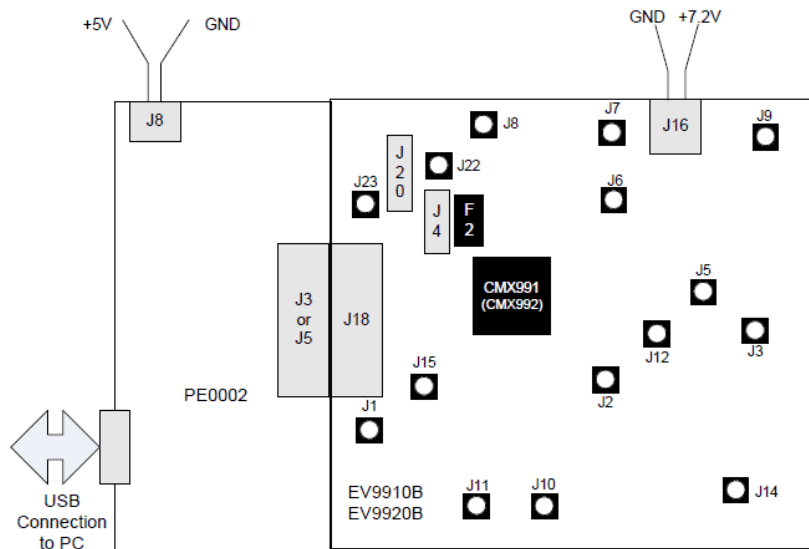


Figura 5.6: Ligação entre as placas EV9910B/EV9920B [27]

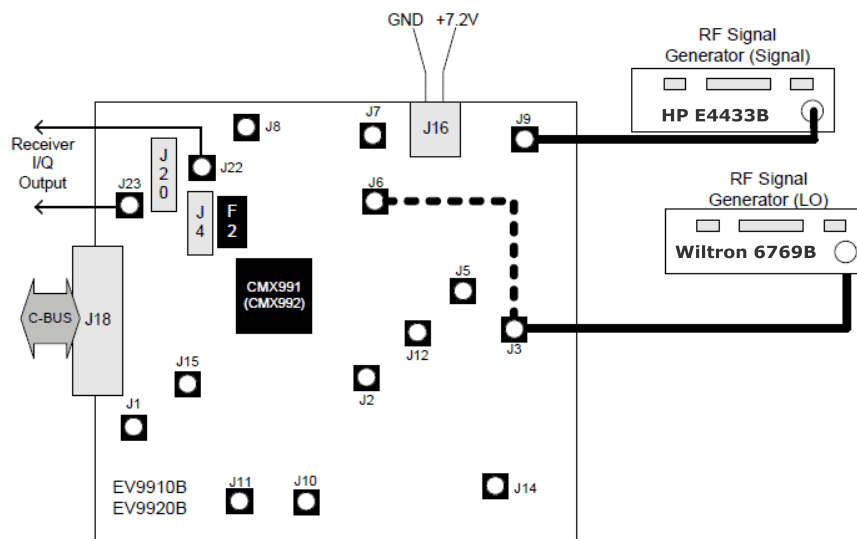


Figura 5.7: Ligações dos instrumentos na placa de desenvolvimento EV9920B [27]

Após os procedimentos anteriores, verificou-se que no pino 1 do conector J4 estava presente um sinal de aproximadamente 400 mV pico-a-pico como era indicado no datasheet e nas saídas do sinal J22 (sinal Q) e J23 (sinal I) um seno e um co-seno de frequência 5KHz como esperado.

Nos diversos testes efectuados o CMX993 mostrou ser uma excelente opção para o design de um front-end, quer em termos de sensibilidade quer em termos de requerer um número mínimo de componentes externos necessários ao seu funcionamento. No entanto, há a salientar um aspecto negativo da placa de desenvolvimento, o facto de vir de origem para recepção das frequências de 450MHz a 470MHz. E, tratando-se disso mesmo, uma placa de desenvolvimento, este factor pode tornar bastante limitativa a evolução de um sistema de rádio. Para uma adaptação correcta à frequência desejada, é necessário a alteração de várias bobines e

condensadores na secção do LNA e dos filtros, bem como na entrada do primeiro mixer, fazendo com que a sua utilização no desenvolvimento de um sistema de rádio, uma solução pouco interessante enquanto placa de desenvolvimento. Neste caso, ainda mais se tivermos em linha de conta que na frequência de 450MHz a 470MHz, é complicado de serem efectuados testes práticos “reais”, pois esta zona de frequências está consignada pela Anacom a redes privadas e digitais [28].

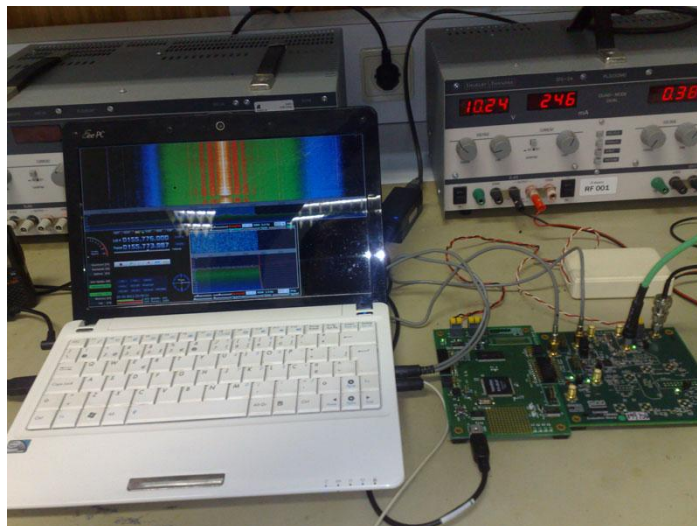


Figura 5.8: Placa de desenvolvimento em Recepção

Mesmo com a configuração de “default” foi possível receber sinais e efectuar a escuta de comunicações nas frequências de 443MHz e 155MHz, o que pareceu demonstrar as excelentes qualidades do CMX992.

A frequência de recepção pode ser calculada da seguinte forma:

$$Freq_{rx} = \frac{OL - PLL}{2} + FI$$

Em que:

OL = Oscilador local;

FI = Frequência intermédia

PLL = Phase

Exemplificando:

OL = 1010MHz

FI = 45MHz

PLL = 180MHz

$$Freq_{rx} = \frac{OL - PLL}{2} + FI = \frac{1010 - 180}{2} + 45 = 460MHz$$

No entanto, como um dos objectivos era ter um receptor de rádio compacto, e em virtude das limitações da placa de desenvolvimento em produzir um modelo facilmente: reconfigurável e ajustável que pudesse ser posteriormente projectado sobre a forma de um circuito (PCB); ser

montado um protótipo. A juntar a estas limitações, encontramos as temporais da sua implementação. Assim, esta solução tornou-se inviável, contudo o sistema de desenvolvimento foi montado numa caixa, a fim da sua possível utilização no âmbito de outra dissertação. Na traseira do equipamento encontram-se as ligações essenciais para o seu funcionamento. Foi introduzido também um fusível na linha da alimentação para proteger eventuais percalços.



Figura 5.9: Sistema final

Com a limitação do tempo, tentei pesquisar no mercado uma solução dum SDR de baixo custo que pudesse ser implementado sobre a forma de um receptor online e que permitisse alguma versatilidade na sua configuração na escolha das frequências a receber. De entre vários analisados destacou-se o FUNcube Dongle, devido ao seu reduzido tamanho (semelhante a uma pen de memória USB), a ausência de alimentação externa (é alimentado pela USB), o sinal é transferido por USB não necessitando de qualquer ligação adicional com a placa de som e principalmente pela ampla gama de recepção, funcionando dos 64 aos 1700 MHz.

5.5 – Receptor FUNcube Dongle

O FUNcube Dongle (FCD) [29] é um receptor SDR miniatura (80x22x15 mm) em forma de uma pen USB, com entrada RF por uma ficha SMA e com saída por USB, desenvolvido pela AMSAT-UK [30]. Recebe de 64 a 1700 MHz (a faixa de 1100 a 1270 MHz não funciona correctamente), mas pode facilmente receber de DC a 1700 MHz através de um simples conversor. Como usa uma taxa de amostragem de 96 kHz, permite ver uma largura de banda com quase 96 kHz. A sensibilidade é de 0,15 μ V para 12 dB SINAD, NBFM em 145 e 435 MHz.



Figura 5.10: FUNcube Dongle ligado ao computador

O FCD é baseado num chip sintonizador (tuner¹) usado nos receptores de TV digitais, o E4000 da Elonics, que converte o sinal de entrada de RF em dois sinais em quadratura I e Q centrados em ZERO Hz (FI zero). A conversão é feita com a ajuda de um oscilador local sintetizado programável controlado a cristal, e dois misturadores. A figura seguinte mostra o diagrama em blocos do FCD:

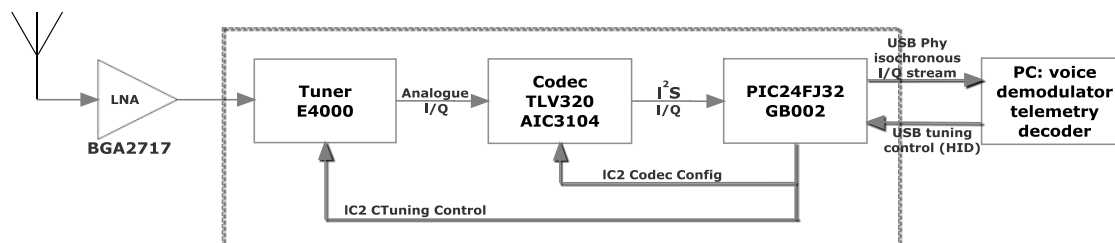


Figura 5.11: Diagrama de blocos do FCD

Os dois sinais analógicos I e Q, centrados em zero Hz, são então digitalizados por um CODEC de áudio (TLV320AIC3104), com taxa de amostragem de 96k amostras por segundo. Um microcontrolador PIC (PIC24FJ32GB002) permite a comunicação com o PC dos sinais digitais I e Q e da programação do tuner. Na figura 6.10 é possível visualizar os circuitos internos do FCD.

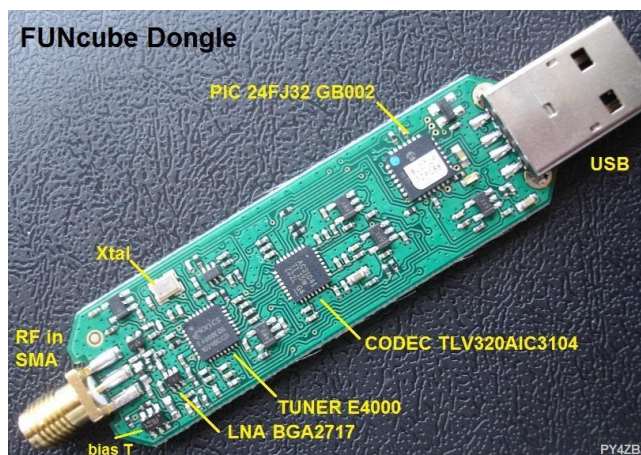


Figura 5.12: Circuitos internos do FCD [31]

O “coração” do FCD e de grande parte dos sintonizadores de TV é o chip Elonics E4000, um chip tuner multibanda de baixa potência. Este chip foi desenvolvido pela companhia inglesa Elonics.

¹ Um tuner é um circuito electrónico que converte sinais rádio existentes no meio para sinais que possam ser processados posteriormente.

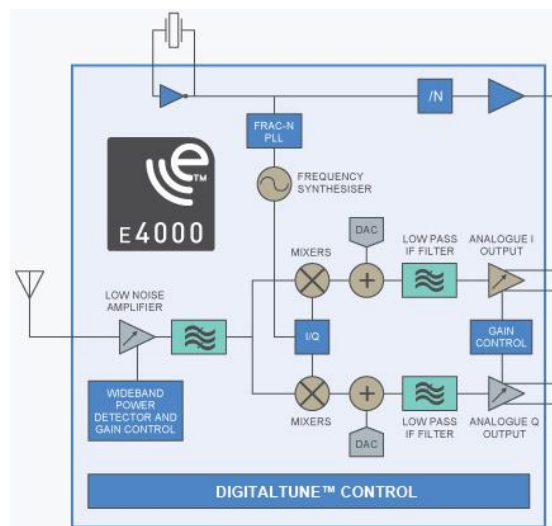


Figura 5.13: Diagrama de Blocos do E4000 [32]

O E4000 tem uma arquitectura de FI zero. Isto significa que ele transfere uma parte do espectro RF directamente para as frequências de banda base sem usar qualquer frequência intermédia. Muitos receptores simples de conversão directa que usam um misturador não rejeitam as frequências de imagem. Uma técnica bem conhecida progressiva resolve este problema. A ideia básica é utilizar dois misturadores alimentados por sinais de osciladores que são 90 graus fora de fase. Os sinais em banda base resultantes são o I (em fase) e o Q (quadratura). Adicionando e subtraindo os sinais em banda base I e Q, permite a separação de bandas laterais superior e inferior e a rejeição de frequências de imagem indesejadas. A amplitude da rejeição de imagem depende de como são as amplitudes e fases dos sinais I e Q.

O E4000 usa esta técnica de fase. Gera os sinais necessários do oscilador usando um sintetizador de frequência a PLL. O datasheet do E4000 [32] indica que funciona sobre toda a faixa entre os 64 MHz e os 1700 MHz. Contudo, de acordo com dados técnicos do FCD, existe uma lacuna entre os 1100MHz e os 1270MHz onde o projecto do oscilador local VCO, PLL e o divisor no chip E4000 não fazem uma cobertura perfeita. Os testes efectuados provam que o FCD pode operar frequências mais baixas até aos 51.5 MHz, e mais altas até cerca dos 2 GHz.

O E4000 é bastante adequado para aplicações de baixo custo, baixo consumo de energia, desempenho médio, alto volume, aplicações sintonizador de TV. É de baixo custo, pois utiliza tecnologia de silício, e baixo consumo de energia, pois utiliza um alto desempenho de sinal misto com tecnologia CMOS que é alimentado com uma tensão baixa de 1,5 V. A capacidade de executar operações digitais e analógicos no mesmo chip, parece ter sido explorada de forma eficaz, assim como a capacidade para controlar o ganho das etapas individuais utilizando um bus de dados simples. Seria interessante saber mais sobre a topologia e do desempenho eléctrico dos misturadores de RF, e da implementação e características de fase de ruído do sintetizador de frequência PLL, mas a informação disponibilizada é escassa.

Algumas das principais características que tornam este chip interessante são:

- Suporte para múltiplas normas de *broadcast*
- Consumo de potência configurável
 - 118mW Operação Típica
 - 15mW em modo de baixa potencia
 - <60uW em espera
- Tensão de Alimentação única de 1.5V
- Amplificador de baixo ruído com ganho variável (LNA)
- Controlo de ganho automático através da intensidade do sinal recebido
 - <4dB Figura de Ruído
 - Gama de frequências de recepção de 64MHz a 1700MHz
- Amplificador de FI e filtro de canal
 - Largura de banda do canal programável
 - Controlo Digital do ganho da IF
- Vários modos de relógio do sistema
 - Master ou Slave
 - Frequência de entrada do sinal para gerar a frequência de relógio variável de 16MHz a 32MHz
 - Gama de saída da frequência do relógio programável
 - Tipos de saída: CMOS ou modo LVDS customizado de baixa potência
- Sintetizador Fraccional N com VCO e filtro da malha integrados
 - Apenas um único VCO para a gama completa de frequências de RF
- Bus de controlo compatível com I2C.
 - Tolerante a interfaces de 3.3V.
 - 4 endereços configuráveis.
- Dimensões 5 x 5x 0.9mm

5.6. – WebSDR

Após a escolha do receptor SDR (FUNcube Dongle), era necessário pensar no tipo de plataforma a utilizar para o controle do rádio online. Entre o desenvolver um script que pudesse executar esta tarefa e tendo em conta o tempo necessário para o desenvolvimento de uma plataforma minimamente aceitável em tempo útil. Após uma pesquisa dos sistemas existentes actuais, foi decidida a utilização do software WebSDR [33].

O WebSDR é uma plataforma Java criada pelo radioamador Pieter-Tjerk, PA3FWM que efectua a desmodulação dos sinais de rádio e permite controlar um receptor de *Software Defined Radio* ligado à internet, permitindo que vários ouvintes possam ouvir e sintonizar simultaneamente. A tecnologia SDR torna possível que todos possam sintonizar de forma independente, e, portanto,

ouvir sinais diferentes, o que está em contraste com os receptores clássicos que se encontram disponíveis através da Internet.

De notar que o WebSDR não se encontra disponível para download, no entanto, o Pieter fornece o ficheiro de instalação por *email* sem qualquer custo para quem pretenda implementar um servidor de acesso público.

5.6.1. – Instalação do WebSDR

Para a instalação de um servidor WebSDR os requisitos mínimos são: um computador a correr o sistema operativo Linux, uma placa de som e uma ligação de internet de banda larga com uma elevada taxa de uplink pois são necessários aproximadamente 100kbit/s por utilizador, dependendo do nível de compressão escolhido. Um processador P3 a 1GHz permite uma capacidade de 40 utilizadores, enquanto um Pentium 4 a 3 GHz permite 200 utilizadores aproximadamente [33].

Para o utilizador (ouvinte) os requisitos necessários para a recepção do WebSDR são: um *browser* (Internet Explorer, Firefox, Opera, Safari, etc) e o plugin de Java 1.4.2 ou superior.

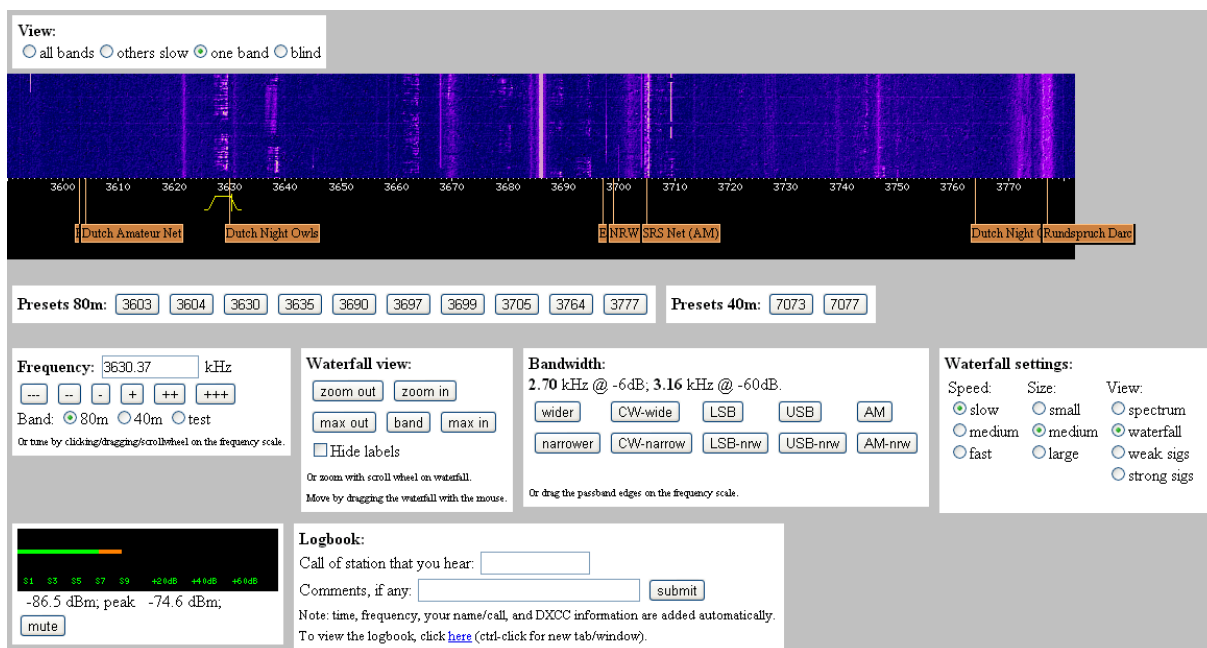


Figura 5.14: Aspecto geral da plataforma WebSDR [33]

Antes de instalar a plataforma é imperativo efectuar o *download* de uma distribuição de Linux. Para este caso a escolha recaiu sobre a versão 12.04 do *Ubuntu* [34]. Após o *download* efectuado, a imagem (ISO) deve ser gravada para um *Compact Disc* (CD) ou para uma pen USB.

Para instalar o Ubuntu devem ser seguidos os passos:

1. Inserir o CD na drive (ou a pen numa porta USB) e entrar Bios para activar como primeiro dispositivo de arranque o leitor de CDs;
2. Quando o CD iniciar, seguir os passos que vão aparecendo no ecrã afim de proceder à instalação do Ubuntu;
3. Depois de concluída a instalação, é aconselhável a actualização do sistema, para isso deverá ser consola e efectuados os seguintes comandos:
`sudo apt-get update;`
`sudo apt-get dist-update;`
4. Por fim deve ser reiniciado o computador e pode-se passar à parte da configuração do websdr.

O websdr é distribuído sobre a forma um ficheiro compactado websdr-dist09.tgz. Para a sua instalação deverá ser aberta um consola e descompactado o ficheiro através do comando:

```
tar -zxvf websdr-dist09.tgz
```

Após a extracção dos ficheiros devem ser efectuados os seguintes passos:

1. Preferencialmente deve ser criada uma conta para o websdr, não é estritamente necessário mas aconselhável do ponto de vista de segurança.
2. Certificar que a nova conta websdr tem permissões de acesso à placa de som, para isso deverá ser efectuado o comando: `adduser websdr áudio`.
3. Dentro da conta criada, deverá ser descompactado o ficheiro websdr-dist09.tgz, esta operação pode ser efectuada pelo gestor de ficheiros ou através da consola com o comando:

```
tar -zxvf websdr-dist09.tgz
```

Após a descompactação do ficheiro será criada a seguinte estrutura:

`/home/websdr/pub` - ficheiros públicos (específicos do site).

`/home/websdr/cfg` - contem os ficheiros de configuração específicos do site.

`/home/websdr/dist09` - outros ficheiros para esta versão.

`/home/websdr/dist09/doc` - contém a documentação.

`/home/websdr/dist09/log` - contém os ficheiros de log detalhados.

`/home/websdr/dist09/pub2` - outros ficheiros públicos , não específicos do site.

`/home/websdr/dist09/pub2/tmp` - Ficheiros temporários públicos.

4. O ficheiro `/home/websdr/dist09/websdr.cfg` deve ser copiado para `/home/websdr/websdr.cfg` através do comando:

```
cp home/websdr/dist09/websdr.cfg /home/websdr/websdr.cfg
```

Com um editor de texto o ficheiro deve ser configurado devidamente com os parâmetros pretendidos.

5. O ficheiro `/home/websdr/dist09/pub2/index.html` deve ser copiado para `/home/websdr/pub` através do comando:

```
cp home/websdr/dist09/pub2/index.html /home/websdr/pub
```

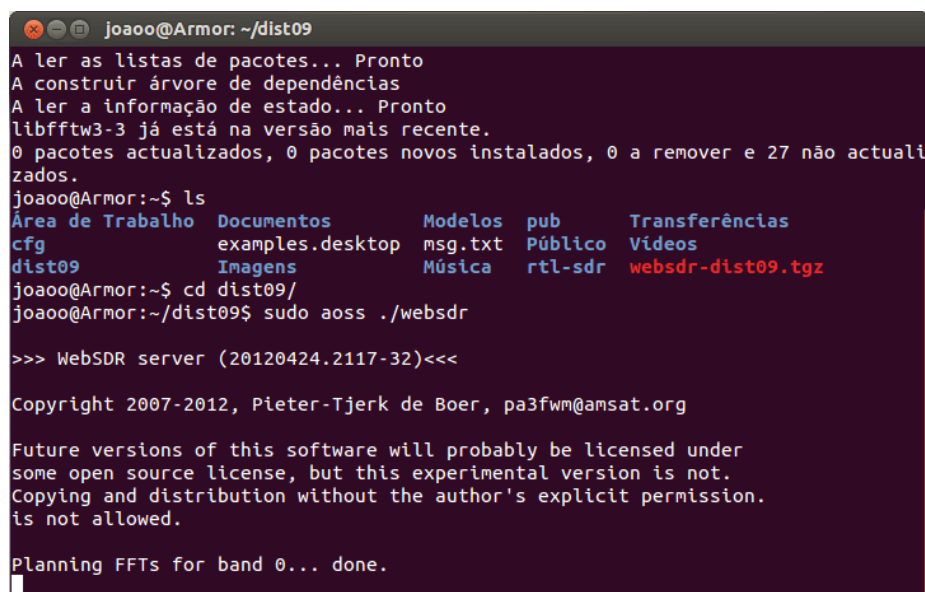
Este ficheiro deverá ser configurado depois de certificado que todo o sistema funciona correctamente.

6. Ir para a directoria `/home/websdr/dist09` e iniciar o servidor websdr através do comando: `./websdr` ou `./websdr64` consoante a versão seja de 32 ou 64 bits. De notar que na versão 12.04 do Ubuntu foi necessária a instalação da `libfftw3-3`. A sua instalação deverá ser efectuada através do seguinte comando:

```
sudo apt-get install libfftw3-3
```

Além disso a execução do sistema é efectuada mediante o comando:

Sudo aoss `./websdr`



```
joaoo@Armor: ~/dist09
A ler as listas de pacotes... Pronto
A construir árvore de dependências
A ler a informação de estado... Pronto
libfftw3-3 já está na versão mais recente.
0 pacotes actualizados, 0 pacotes novos instalados, 0 a remover e 27 não actuali
zados.
joaoo@Armor:~$ ls
Área de Trabalho  Documentos      Modelos  pub      Transferências
cfg               examples.desktop msg.txt  Público  Vídeos
dist09           Imagens        Música   rtl-sdr  websdr-dist09.tgz
joaoo@Armor:~$ cd dist09/
joaoo@Armor:~/dist09$ sudo aoss ./websdr

>>> WebSDR server (20120424.2117-32)<<<

Copyright 2007-2012, Pieter-Tjerk de Boer, pa3fwm@amsat.org

Future versions of this software will probably be licensed under
some open source license, but this experimental version is not.
Copying and distribution without the author's explicit permission.
is not allowed.

Planning FFTs for band 0... done.
```

Figura 5.15: Servidor WebSDR a correr

5.6.1.1 – Configuração dos ficheiros websdr.cfg e index.html

O ficheiro `websdr.cfg` contém as configurações de todo sistema, nele podem ser definidos diversos parâmetros:

- Número de utilizadores;
- Porta de acesso pelo qual o sistema deverá escutado;

- Localização do sistema e breve descrição;
- Nome e banda seleccionada;
- Taxa de amostragem;
- Centro da frequência;
- Ganho e atenuação;
- Calibração do S-meter;

Numa primeira fase foram usadas as seguintes configurações:

```
maxusers 10
tcpport 80
org qth IM59rg
band Air Band
samplerate 96000
centerfreq 126420
```

Com a finalidade de testar o servidor, foi escolhida a frequência da banda aérea devido à sua constante actividade. Para isso o receptor foi testado nos 126.400 (canal da meteorologia aérea).

No ficheiro index.html efectuam-se as configurações visuais do cabeçalho do sistema.

O ficheiro index.html carrega ficheiro, websdr-controls.html onde

5.7 – Receptor DVB-T

O uso de receptores DVB-T, como receptores rádio definidos por *software*, começou quando, por coincidência, Antti Palosaari (investigador/programador de V4L/DVB do kernel – núcleo central dos sistemas Linux) descobriu que o EZCAP EzTV 668 DVB-T/FM/DAB USB Dongle – baseado no circuito RTL2832U da Realtek – transportava/transmitia as amostras dos sinais I/Q decodificadas para o computador anfitrião onde o receptor se encontrava ligado. Esta transferência das amostras, é de facto a razão pela qual estes dispositivos suportam a recepção de sinais FM e DAB, visto que a sua desmodulação é feita em *software* pelos programas a correrem no computador [35].

O circuito integrado RTL2832U envia amostras de 8 bits dos sinais I/Q a uma taxa de transferência máxima teórica de 3.2MS/s, no entanto, taxa de amostragem máxima sem percas de pacotes testada foi de 2.9MS/s, mas este desempenho está bastante dependente da arquitectura do processador e sistema operativo utilizado (tabela 6.1). A gama de frequências de recepção é altamente influenciada pelo sintonizador utilizado. Os dispositivos mais comuns utilizam o circuito E4000 de Elonics (o mesmo que é utilizado no Funcube) que apresenta a maior largura de banda (64 – 1700MHz com excepção do intervalo dos 1100 aos 1250MHz). É contudo possível utilizar tais sintonizadores nas gamas de 50 a 2200MHz (com a mesma falha da gama anterior), mas

nesse caso, a performance do sintonizador fica aquém das especificações apresentadas pelo fabricante. Nos testes efectuados em laboratório, o ezcac mostrou boa performance nas gamas de frequências de 51MHz a 1900MHz.

Processador	Sistema operativo	Largura Banda (MHz)
Intel Pentium 4 3GHz	Ubuntu 12.04 (32 bits)	1.8
Intel Core Duo 1.6 GHz	Ubuntu 12.04 (32 bits)	2.8
Intel i5-560 2.66 MHz	Fedora 17 (64 bits)	2.4
Intel Quad Core 2.66 MHz	Ubuntu 12.04 (32 bits)	2.9

Tabela 5.1: Desempenho do receptor RTLSDR

O RTL2832U é um desmodulador DVB-T COFDM de alta performance com suporte para ligação USB 2.0. Este dispositivo está em conformidade com as normas NorDig Unified 1.0.3, D-Book 5.0, e EN300 744 (Especificação ETSI) e suporta os modos 2K ou 8K com 6, 7, e 8MHz de largura de banda. Os parâmetros de modulação do sinal, como por exemplo intervalo de guarda e ritmo de codificação são automaticamente detectados.

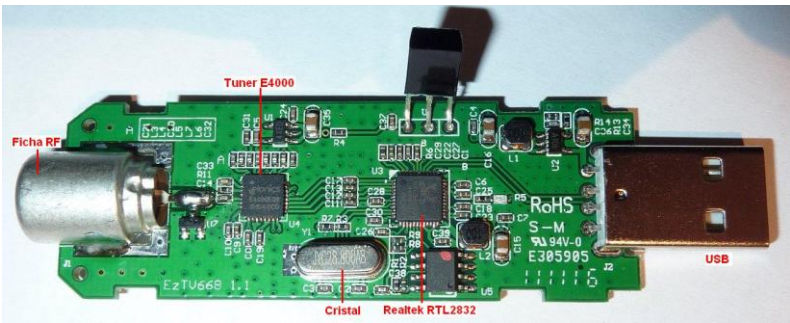


Figura 5.16: Circuitos internos do receptor DVB-T [35]

O circuito RTL2832U suporta sintonizadores com FI (36.125MHz), FI baixa (4.57MHz), ou sem IF. Usa um cristal de 28.8MHz para gerar a frequência de relógio, e tem suporte para FM/DAB/DAB+. Equipado com uma avançada ADC que permite uma alta estabilidade na recepção portátil.

O RTL2832U inclui algoritmos proprietários da Realtek (que estão sobre processo de patenteamento), para estimativa dos efeitos do canal, rejeição de interferências cocanal, minimização de efeitos de recepção de reflexões do sinal, e cancelamento de ruído, apresentando-se assim como uma solução fiável para um vasto uso em aplicações de recepção de sinais de televisão, e consequentemente devido ao trabalho desenvolvido por Antti Palosaari para recepção de sinais de rádio em geral.

Embora a informação da Realtek seja limitada, algumas das características mais relevantes do RTL2832U são [35]:

- COFDM em conformidade com Nardig Unified 1.0.3, D-book 5.0, and ETSI 300-744
- Suporte de múltiplas frequências de FI (4.57MHz ou 36.167MHz) e inversão de espectro
- Inclui recepção de rádio (FM/DAB/DAB+)
- Inclui ISDB-T(SBTVD-T) 1-Seg
- Suporta entrada de sinal directa sem IF.
- Cristal Oscilador único para gerar a frequência de relógio ($\pm 100\text{ppm}$)
- Detecção automática do modo de transmissão e do intervalo de guarda
- Circuitos de cancelamento de ruído
- Recuperador de portadora automático com o grande intervalo de desvio ($\pm 800\text{KHz}$)
- Elevada performance com pre/pos/extensos efeitos de reflexão do sinal
- Circuito para rejeição de canais adjacentes e co-canais
- Atraso de AGC com arranque programável.
- ADC de 7-bits para medição do nível do sinal
- Filtros físicos para MPEG-2
- Porta de Infravermelhos para controlo remoto e arranque com suporte para os protocolos:
 - Protocolo RC6 da Microsoft
 - NEC, Sony, SIRC, protocolo RC-5
- Oito portas de I/O para uso geral
- Interface USB 2.0
 - Suporte USB no modo de comunicação Full/High Speed
 - Configuração da Informação do Vendedor através de uma EEPROM externa
 - Em conformidade com a certificação USB-IF
- Tensão de alimentação de 3.3V
- Caixa 48-pinos QFN (6x6 mm²)

Estas características fazem do RTL2832U uma excelente opção para aplicações portáteis e pequenos receptores portáteis de baixo custo.

Assim com o conjunto, RTL2832U e E4000 é possível obter um sistema de rádio de baixinho custo. O EZCAP EzTV 668 DVB-T/FM/DAB USB Dongle testado neste trabalho teve um custo de aproximadamente 15€ (custo total incluindo o envio), mas existem outros modelos equivalentes com preços inferiores a 10€.

Existem variados modelos de receptores DVB-T disponíveis no mercado que permitem explorar estas potencialidades (tabela 6.2).

Receptor	USB ID	Chipset/tuner
ezcap EzTV668	0BDA:2838	RTL2832U/E4000
ezcap EzTV666		RTL2832U/E4000
ezcap EzTV646	0BDA:2838	RTL2832U/E4000
Terratec NOXON DAB/DAB+ (Ver. 1)	0CCD:00B3	RTL2832U/FC0013
Terratec NOXON DAB/DAB+ (Ver. 2)	0CCD:00E0	RTL2832U/E4000
Terratec Cinergy T Stick Black (Rev. 1)	0CCD:00A9	RTL2832U/FC0012
Terratec Cinergy T Stick RC (Rev. 3)	0CCD:00D3	RTL2832U/E4000
Hama Nano		RTL2832U/E4000
MyGica/G-Tek T803	1F4D:B803	RTL2832U/FC0012
Unikoo UK001T (P160)		RTL2832U/E4000
Newsky TV28T		RTL2832U/E4000
Dexatek DK BVB-T Dongle	1D19:1102	RTL2832U/FC0013
MSI DigiVox mini Deluxe	1D19:1101	RTL2832U/FC0013
Ardara MyVision	1B80:D393	RTL2832U/FC0012
Genius TVGo DVB-T03 (Ver:B)	0458:707F	RTL2832U/FC0012
Lifview LV5TDeluxe	1F4D:C803	RTL2832U/FC0012
Logilink VG0002A	1D19:1101	RTL2832U/FC0013
PROlectrix DV107669	1F4D:D803	RTL2832U/FC0012
Compro Videomate U620F	185B:0620	RTL2832U/E4000
Compro Videomate U650F	185B:0650	RTL2832U/E4000
Gigabyte GT-U7300	1B80:D393	RTL2832U/FC0012
Dikom USB-DVB-T HD	1B80:D394	RTL2832U/ ?
Peak 102569AGPK	1B80:D395	RTL2832U/FC0012
Sveon STV20 DVB-T USB & FM	1B80:D39D	RTL2832U/FC0012

Tabela 5.2: Lista de receptores compatíveis [35,37]

Basicamente qualquer receptor que tenha incluído o RTL2832U funciona, quanto ao chip de recepção (tuner) existem alguns outros modelos compatíveis para além do E4000 (tabela 6.3).

Estas pens USB receptoras compostas pelo RTL2832U+tuner são vulgarmente conhecidas e muito referenciadas por RTLSDR.

Chip	Gama de recepção
Elonics E4000	52 - 2200 MHz com um intervalo entre 1100 MHz a 1250 MHz
Fitipower FC0012	22 - 948.6 MHz
Fitipower FC0013	22 - 1100 MHz (FC0013B/C, FC0013G têm uma entrada separada para a banda L, desligada na maioria das vezes)
Fitipower FC2580	146 - 308 MHz e 438 - 924 MHz
Rafael Micro R820T	24 - 1766 MHz

Tabela 5.3: Lista de chips de recepção [37]

Inicialmente apenas suportado no sistema operativo Linux, o RTLSDR hoje em dia também permite a sua utilização no sistema operativo Microsoft Windows através da instalação do driver Zadig. Para isso devem ser seguidos os passos:

1. Efectuar o *download* em http://users.on.net/~balint/ExtIO_USRP+FCD+RTL2832+BorIP-BETA_Setup.zip;
2. Ligar o Ezcap na porta USB;

3. Extrair o ficheiro .ZIP e executar o installer contido nele. Em caso de já ter instalado o HDSDR, efectuar a instalação na mesma pasta. Durante o processo de instalação é perguntado sobre instalar o driver Zadig. Em caso da pen não ser reconhecida automaticamente, deverá ser seleccionada a opção Interface 0 e carregado na opção install drivers ou replace drivers. Fechar a instalação do Zadig e completar o resto da instalação.
4. Quando completo deve ser extraído o conteúdo de <http://spen.ch.net/drupal/files/librtl2832++.zip> para a mesma directoria onde se encontra instalado o HDSDR (ou EXTIO se foi escolhida uma localização diferente). Poderá ser necessário apagar ou renomear o ficheiro existente antes de o substituir;
5. Iniciar o HDSDR;
6. Ignorar os erros na primeira execução. Devem ser abertas duas janelas, a do HDSDR e a do device control. Seleccionar o device control window e por baixo de “Device Hint” colocar “RTL readlen=8192 tuner=e4k”. Carregar em Create. Em condições normais, o RTLSDR estará configurado e pode-se voltar à janela do HDSDR e iniciar a sintonia da frequência desejada.

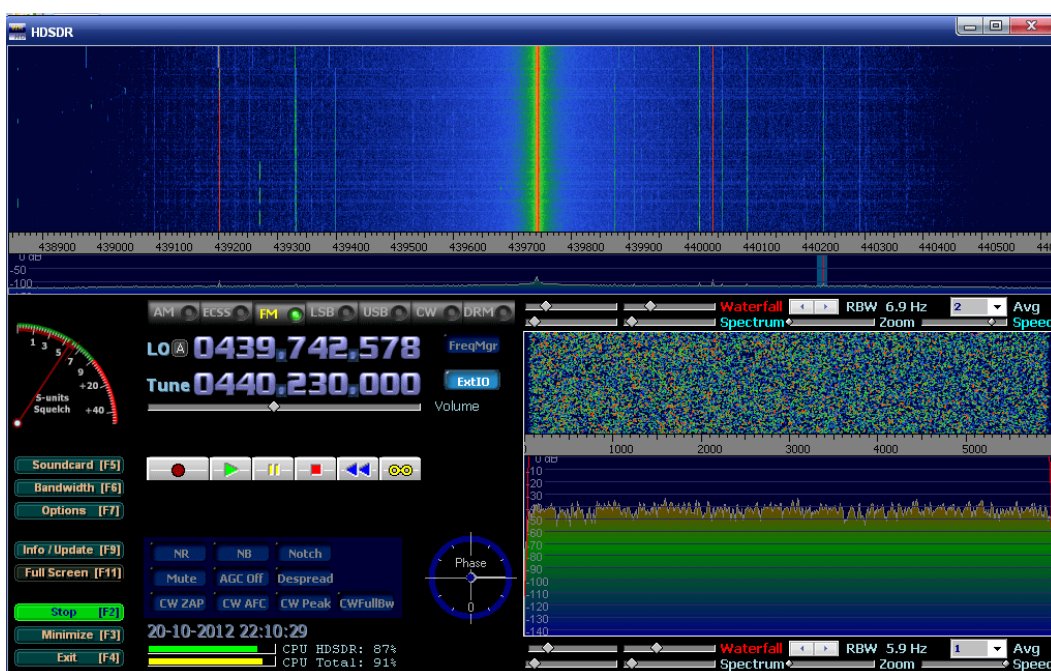


Figura 5.17: Janela do programa HDSDR

No entanto o HDSDR, à semelhança de outros *softwares* disponíveis para o sistema operativo Microsoft Windows (WRplus, SDR-RADIO, entre outros), a sua funcionalidade é bastante limitada pois são programas desenvolvidos por terceiros sem código fonte disponível, limitando o seu desenvolvimento às necessidades do utilizador.

Para esse efeito, e com vista a tirar partido das potencialidades do RTLSDR, é aconselhado o uso do *software* de distribuição livre e aberto chamado Gnu Radio.

5.8 – GNU Radio

GNU Radio é uma ferramenta de desenvolvimento de *software* livre e de código aberto que fornece blocos de processamento de sinais para implementar rádios definidos por software. Pode ser usado com um *hardware* de RF externo de baixo custo para criar rádios definidos por software, ou sem hardware, num ambiente de simulação. Esta ferramenta é bastante utilizada por amadores em ambientes académicos e comerciais para dar suporte tanto a pesquisas em comunicações sem fios, como em sistemas de rádio reais e é a ferramenta ideal para explorar as potencialidades do RTLSDR.

O desenvolvimento do GNU Radio é feito sob a licença GNU General Public Licence (GPL), versão 3 e todos os seus direitos de autor do seu código-fonte pertencem à Fundação do Software Livre (FSF). As aplicações no GNU Radio são escritas na linguagem de programação Python, enquanto as funções de processamento de sinais de desempenho crítico são escritas em C++ usando extensões de processamento de ponto flutuante, quando disponível. Isto permite ao programador implementar sistemas de rádio de tempo real num ambiente de desenvolvimento rápido de aplicações de uso simples [38].

5.8.1. – Instalação do GNU Radio

O GNU Radio corre no sistema operativo Linux e a sua instalação requer bastante cuidado, pois são necessários vários pré-requisitos e dependências na sua instalação.

Em geral a maneira mais simples de instalar é através do comando:

```
wget http://www.sbrac.org/files/build-gnuradio && chmod a+x ./build-gnuradio && ./build-gnuradio
```

Caso alguma coisa falhe, é aconselhável antes de começar a instalação verificar se estão instalados os pré-requisitos:

- Ferramentas de desenvolvimento (necessário para compilação)
 - g++
 - git
 - make
 - cmake
- Bibliotecas (necessárias para execução e compilação)
 - python-dev, libfftw3-dev, SWIG, libcppunit-dev, Boost 1.35 (or later), libgsl0-dev, libusb, libusb-dev, alsa-base, libasound2 e libasound2-dev

- GNU Radio Companion
python-numpy, python-cheeta e python-lxml
- WX GUI
python-wxgtk2.8 e python-numpy
- QT GUI
PyQT4, PyQwt5, QT-OpenGL, Fontconfig, Xrender, python-qt4, python-qwt5-qt4, libqt4-opengl-dev, libqwt5-qt4-dev, libfontconfig1-dev, libxrender-dev, libxi-dev
- Video-SDL
libsdl1.2-dev
- Polyphase Filter Bank examples
python-scipy, python-matplotlib, and python-tk

Para instalar o GNU Radio:

```
git clone http://gnuradio.org/git/gnuradio.git
```

ou

```
git clone git://gnuradio.org/gnuradio.git
```

```
cd gnuradio
mkdir build
cd build
cmake ../
make
sudo make install
```

5.8.2. – Funcionamento

O Gnu Radio contém uma biblioteca de blocos de processamento de sinal, para além de toda uma estrutura que permite a sua interligação, permitindo assim ao utilizador implementar um sistema SDR sob a forma de um grafo (figura 6.16), onde os vértices representam os blocos de processamento de sinal e as arestas representam o fluxo de dados entre os mesmos.

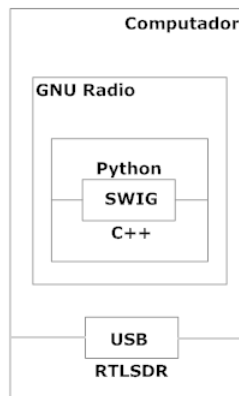


Figura 5.18: Esquema do funcionamento do GNU Radio em conjunto com o RTLSDR

Os blocos do GNU Radio processam fluxos de dados que seguem o caminho das portas de entrada para as portas de saída. Existem blocos apenas com portas de entrada ou apenas de saída, funcionando como *sinks* (sumidouros) ou *sources* (fontes) de dados no grafo. No GNU Radio as *fontes* podem ser blocos que geram sinal ou ruído, lêem o conteúdo de um ficheiro ou recebem uma transmissão de rádio. Os *sumidouros* podem escrever num ficheiro, apresentar informações num gráfico ou realizar uma transmissão de rádio.

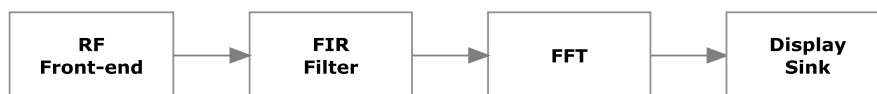


Figura 5.19: Grafo de fluxo do GNU Radio

Os blocos do GNU Radio oferecem funcionalidades como: filtros, conversores, moduladores/desmoduladores de sinais, funções matemáticas, codificação/descodificação de sinais, transformadas de *Fourier* ou *Wavelet*, interfaces de leitura ou escrita de dados em ficheiros, interfaces gráficos para análise em tempo real, entre muitas outras funcionalidades. Existem ainda blocos que permitem realizar a interface com dispositivos de *hardware* como a USRP, USRP2, FunCube, RTLSDR, permitindo tanto a receção, como a transmissão (consoante o hardware disponibilize).

Os dados para a representação das amostras implementadas pelos blocos do GNU Radio são feitos sob a forma de vectores, existindo quatro tipos:

- complex – dados de 8 bytes representados pela letra c;
- float - dados de 4 bytes representados pela letra f;
- short int – dados de 2 bytes representados pela letra s;
- char – dados de 1 byte representados pela letra b.

A tarefa da construção de um sistema de rádio definido por *software* no GNU Radio fica ainda mais facilitada graças ao GNU Radio Companion (GRC). O GRC é nada mais que uma

interface gráfica criada para o GNU Radio, permitindo assim uma maior facilidade na criação de um projecto, ao invés da programação no GNU Radio. Todo este projecto foi elaborado no GRC [39,40].

5.8.3. – Aplicação prática

A figura 5.40 ilustra o diagrama de blocos do receptor AM-FM-SSB desenvolvido no Gnuradio-Companion, que permite gerar os respectivos diagramas de fluxo de sinal através de sistemas modulares.

O sistema apresentado foi desenvolvido recorrendo a algumas ideias dos exemplos do GNU Radio. Este sistema é constituído por diversos blocos que constituem a solução final, e que irão de seguida ser analisados seguindo o percurso do sinal ao longo do sistema.

5.8.3.1. – Parâmetros

Para começar é necessário especificar alguns parâmetros sobre o sistema em si, nomeadamente o nome da aplicação, a área de trabalho do ambiente de desenvolvimento, o tipo de processamento, a biblioteca gráfica da aplicação, entre outros. Estes parâmetros são definidos no bloco “Options” (figura 5.20), sendo que o parâmetro que deve ser referido, pela sua importância, é o tipo de escalonamento.

A importância deste parâmetro deve-se ao facto de como o sistema deve responder ao processamento da tarefa. Assim, como a quantidade de dados a ser processada é muito elevada e a ordem das instruções deve ser criteriosa, o sistema deve responder de forma prioritária às chamadas vindas da aplicação. A escolha por um escalonamento em tempo real desta tarefa permite com que o computador anfitrião dê um nível de prioridade mais elevado a estas instruções.

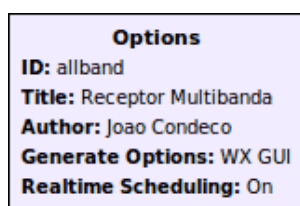


Figura 5.20: Bloco "Options"

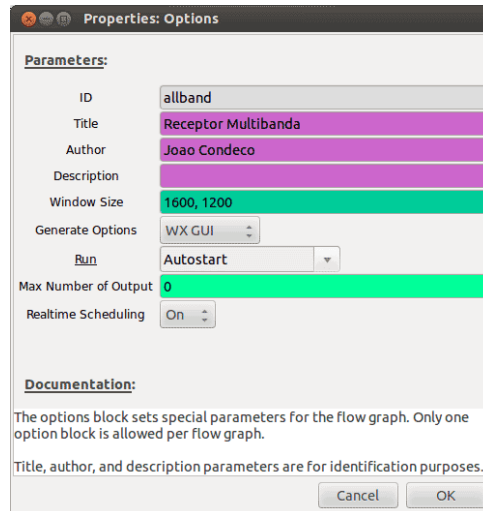


Figura 5.21: Parâmetros do bloco “Options”

5.8.3.2. – Variáveis e funções matemáticas

A especificação de algumas variáveis e definições permitem não só a reutilização desses valores pelos vários blocos, mas também que os mesmos possam ser alterados após o arranque da aplicação. O utilizador final poderá assim modificar os parâmetros do receptor, sem ter que modificar o sistema. Estas variáveis, que se encontram definidas com valores por defeito, estipulam o comportamento inicial da aplicação e são elas que controlam, por exemplo: a frequência, o volume, o modo, entre outras funcionalidades.

Variable	Variable	Variable
ID: samp_rate	ID: audio_samp_rate	ID: lpf_decim
Value: 1M	Value: 48k	Value: 10

Figura 5.22: Variáveis do sistema

Para fazer a ponte entre as variáveis e o ambiente gráfico à disposição do utilizador final, é preciso especificar controlos para modificação desses valores, quer seja por meio de introdução com o teclado (por exemplo: a frequência); por caixas de selecção (por exemplo: o modo); por barras deslizantes (por exemplo: frequência de corte do filtro); entre outros.

Alguns desses blocos estão expostos na figura 5.23, onde se pode verifica que todos contêm um campo “Grid Position” onde é definida a localização desse controlo na interface do utilizador.

O bloco “WX GUI Text Box” define a frequência do programa, por defeito o sistema inicia sintonizado na frequência de 101.7MHz.

O bloco “WX GUI Static Text” destina-se à indicação da potência média do sinal recebido.

O bloco “WX GUI Notebook” destina-se a definição dos três gráficos apresentados pela aplicação.

Os blocos “*WX GUI Slider*” destinam-se a ajustar os parâmetros do *squelch*, volume, ganho e filtro passa-banda. Em todos eles se encontra definido um valor de arranque por defeito e a gama de variação.

O bloco “*WX GUI Chooser*” destina-se às opções para selecção da desmodulação a utilizar.

WX GUI Text Box ID: freq Label: FREQ Default Value: 101.7M Converter: Float Grid Position: 8, 0, 1, 2	WX GUI Static Text ID: variable_static_text_0 Label: RF Power Default Value: -255.587 Converter: Float Grid Position: 8, 3, 1, 2	WX GUI Notebook ID: notebook_0 Tab Orientation: Top Labels: RF, Audio, Waterfall Grid Position: 0, 0, 8, 10
WX GUI Slider ID: sql_lev Label: SQL Default Value: -36 Minimum: -100 Maximum: 100 Converter: Float Grid Position: 9, 3, 1, 2	WX GUI Slider ID: af_gain Label: VOL Default Value: 1 Minimum: 0 Maximum: 5 Converter: Float Grid Position: 9, 0, 1, 2	WX GUI Chooser ID: fmn Label: MODE Default Value: 0 Choices: 0, 1, 2, 3 Labels: NFM, WFM, AM, SSB Type: Drop Down Grid Position: 8, 6, 1, 1
WX GUI Slider ID: HighCutOff Label: High Cut Off Frequency Default Value: 6k Minimum: 100 Maximum: 250k Converter: Float Grid Position: 9, 8, 1, 1	WX GUI Slider ID: LowCutOff Label: Low Cut Off Frequency Default Value: 50 Minimum: 1m Maximum: 200k Converter: Float Grid Position: 9, 6, 1, 1	WX GUI Slider ID: rx_gain Default Value: 15 Minimum: 0 Maximum: 30 Converter: Float Grid Position: 8, 8, 1, 1

Figura 5.23: Blocos com as definições do sistema

Foi ainda utilizado o bloco “*Import*”, para importar a biblioteca “*math*” que contem várias funções matemáticas, necessárias por exemplo para o cálculo da potência média do sinal.

Após estas descrições gerais sobre o fundamental em qualquer sistema desenvolvido neste ambiente, vamos passar ao funcionamento do sistema em particular.

5.8.3.3. – Fonte do sistema

O sinal proveniente do receptor baseado no chip RTL2832U entra no sistema através do bloco “*RTLSDR Source*”, onde é necessário especificar a largura de banda a amostrar, a frequência central em torno da qual o receptor está sintonizado e o ganho deste bloco, entre outros parâmetros.

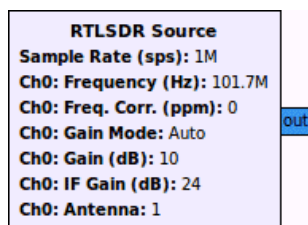


Figura 5.24: Bloco RTLSDR

5.8.3.4. – Sinks

Para se proceder à visualização do espectro rádio capturado pelo bloco anterior, utiliza-se um bloco designado por “*FFT Sink*” (figura 5.25) que apresenta um gráfico na aplicação final, centrado na frequência de sintonia e com uma largura de banda igual à amostrada pelo bloco anterior.

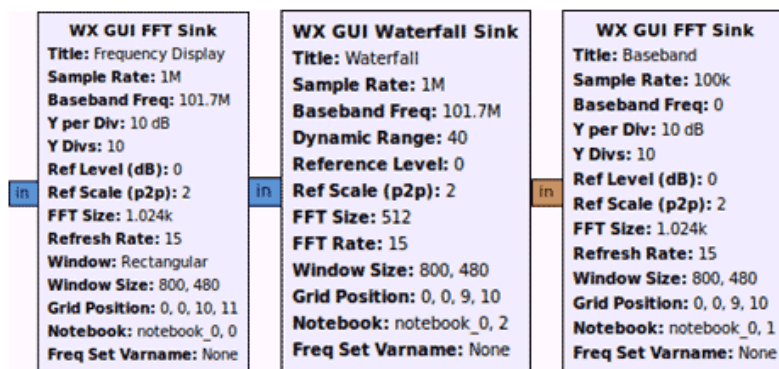


Figura 5.25: Blocos das sinks utilizadas

Foram utilizadas três *sinks* no projecto seleccionadas na janela do programa sob a forma de *tabs*. A primeira *sink* destina-se a mostrar a frequência de recepção (figura 5.26).

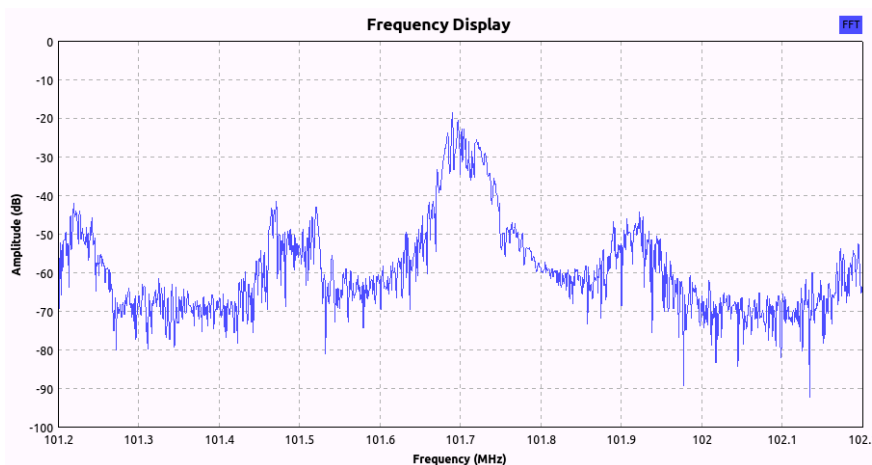


Figura 5.26: Visualização do sinal recebido

A segunda é uma *waterfall* (figura 5.27), um gráfico com duas dimensões geométricas, onde o eixo horizontal representa a frequência e, o eixo vertical o tempo. Uma terceira dimensão indica a amplitude do sinal, apresentando a intensidade (dB) sob a forma de pontos de cor como indicado na escala lateral. Sinais com maior intensidade apresentam cores com valores de temperatura mais quentes (vermelhos), enquanto os sinais mais fracos são representados por tons de cor mais frios (azul).

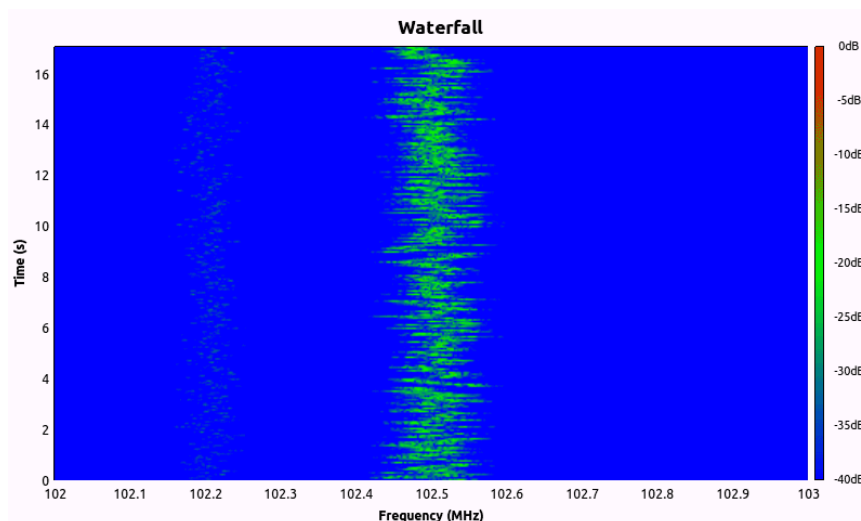


Figura 5.27: Waterfall do sinal

A terceira *sink* encontra-se depois das etapas de desmodulação do sinal, mostrando o espectro do sinal desmodulado em banda base (figura 5.28).

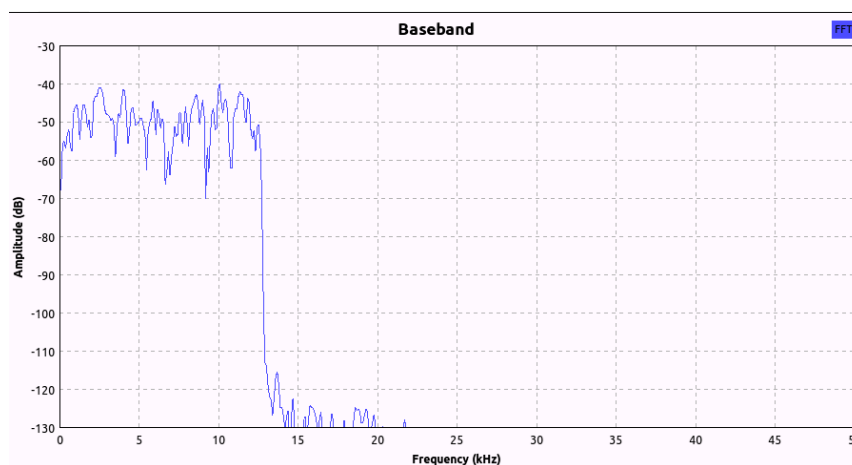


Figura 5.28: Sinal em banda base

5.8.3.5. – Filtro passa-baixo

O sinal após ser amostrado é filtrado para atenuar os sinais indesejados fora da banda de amostragem. Para esse efeito é utilizado um “*Low Pass Filter*” com os seguintes parâmetros: “*Sample Rate*” igual à gama de frequências amostradas no bloco “*Source*” – para tirarmos o máximo partido do espectro amostrado. Desta forma eliminamos possíveis fontes de ruído que esteja fora do espectro amostrado, impedindo que esses sinais passem aos circuitos de desmodulação.

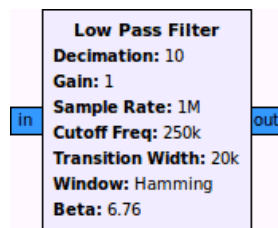


Figura 5.29: Filtro passa-baixo

5.8.3.4. – Squelch e controlo automático de ganho (AGC)

O bloco “*Simple Squelch*” define o valor mínimo do sinal para que este seja alimentado ao bloco seguinte. Para sinais com potências médias inferiores a -36dB (valor por defeito) o bloco corta o sinal, não sendo possível escutar nada, mais à frente na saída de som.

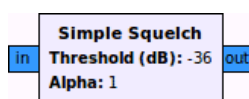


Figura 5.30: Bloco do squelch

O bloco “AGC”, como o próprio nome indica é responsável pelo controlo automático do ganho, para que o sinal apresente uma resposta mais ou menos constante ao próximo bloco e por consequência ao resto do espectro.

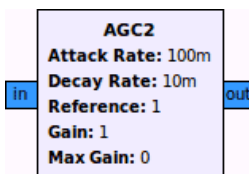


Figura 5.31: Bloco do AGC

5.8.3.5. – Desmoduladores

A próxima etapa no caminho do sinal são os desmoduladores do sinal em si.

Para sinais modulados em frequência de banda estreita temos o bloco “*NBFM Receive*” configurado com um desvio de frequência máximo de 12.5 KHz.

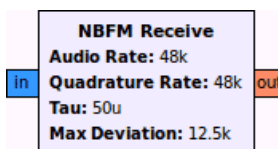


Figura 5.32: Bloco do desmodulador de NBFM

Para sinais modulados em frequência de banda larga temos o bloco “*WBFM Receive*”.



Figura 5.33: Bloco do desmodulador de WBFM

A desmodulação dos sinais modulados em amplitude é efectuada pelo bloco “*AM Demod*”.

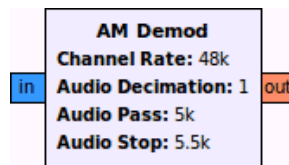


Figura 5.34: Bloco do desmodulador de AM

Estes vários desmoduladores são ligados ao bloco “*Selector*” que selecciona um destes sinais, já desmodulados, e o coloca na saída, segundo instruções dadas pelo utilizador através do controlo (caixa de selecção descrita acima) e que pode ser visualizado na figura 5.35.

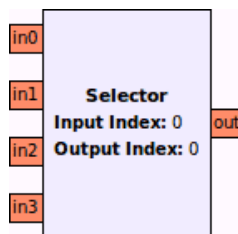


Figura 5.35: Bloco selector da modulação

5.8.3.6. – Filtro passa-banda

O próximo bloco no caminho do sinal é o filtro passa-banda para selecciona o sinal em banda base que se deseja ouvir na saída de som. Este filtro permite a configuração da frequência inferior e da frequência superior de corte.

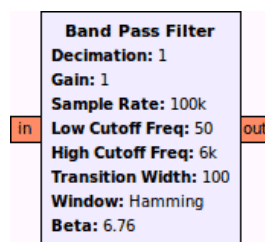


Figura 5.36: Bloco do filtro passa-banda

Quando a frequência de corte inferior é aproximadamente nula (na realidade nunca o pode ser, uma vez que se trata de um filtro passa-banda e como tal o sistema não o permite), o comportamento do filtro é aproximado ao de um filtro passa-baixo. A largura mínima permitida pelo sistema foi definida para 50Hz, assim sendo, a frequência superior de corte terá sempre obrigatoriamente que ser 50Hz mais elevada que a frequência de corte inferior. Este valor mínimo

foi definido, para impedir que existam problemas na configuração do filtro por parte do utilizador e porque não existem muitos casos onde os sinais apresentem componentes espectrais inferiores a esse valor. É ainda importante referir que o sistema comuta automaticamente a largura de banda do filtro, dependendo do modo. Assim por exemplo quando seleccionado o modo de AM ou SSB a largura de banda do filtro comuta automaticamente para 6kHz (largura típica de receptores deste modo).

Seguidamente A FFT do sinal filtrado pode ser visualizado num novo gráfico, onde é permitido ao utilizador verificar o correcto funcionamento do filtro passa-banda, pois dependendo das frequências de corte definidas a componente espectral do sinal é diferente.

5.8.3.7. – Reprodução do áudio

Ainda antes de ser reproduzido pelo computador, o sinal é convertido para que a placa de som seja capaz de o interpretar, assim é necessário decimar o sinal por 100 e interpolar por 48 para que o sinal final esteja compreendido entre 0 e 48kHz (imposto pelo limite da placa de som do computador anfitrião do sistema).

O último bloco do sistema, designado por “*Audio Sink*”, é responsável pela emissão do sinal áudio para a placa de som do computador, que neste caso ao correr num sistema Linux é configurado para utilizar o *pulse* para usar o servidor de áudio do sistema - o *PulseAudio*. Este servidor local é responsável por todo o controlo de áudio do sistema. Paralelamente é utilizado, um bloco designado por “*Wav File Sink*”. Este bloco é responsável pela gravação do áudio no computador no formato de *wave*. Nele pode ser definido o nome do ficheiro e a sua localização.

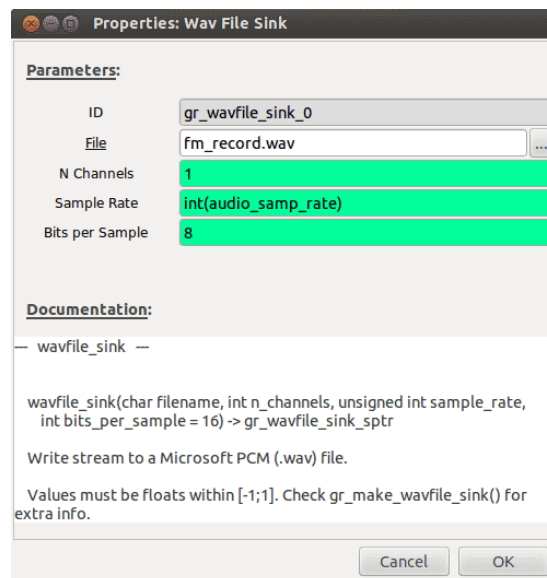


Figura 5.37: Configuração do bloco de gravação de áudio

5.8.4. – Aplicação para stream

A aplicação para o receptor em rede por *stream* (figura 5.41) segue exactamente o mesmo princípio, com a excepção da fonte de sinal ser o bloco “*TCP Source*” ao invés do “*RTLSDR Source*”, que neste caso, se encontra do lado do servidor de rádio (figura 5.38) e os dois blocos que permitem controlar os parâmetros frequência e ganho.

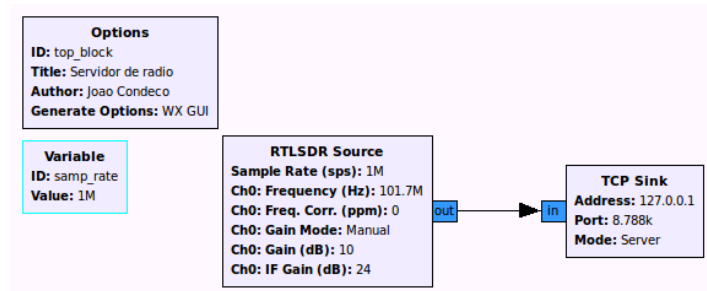


Figura 5.38: Servidor de rádio por stream implementado em GRC

Neste caso, a definição da “*sample rate*” fica do lado do servidor. Ao contrário da aplicação anterior, o utilizador fica limitado apenas ao espectro limitado por ela. Na aplicação anterior, a taxa de “*sample rate*” delimitava apenas o espectro visualizado.

Os dois blocos “*XMLRPC Client*” destinam-se a fazer os ajustes da frequência e do ganho do sistema.

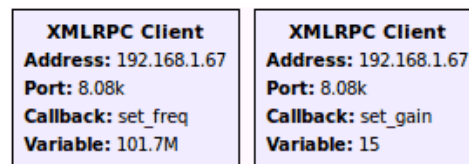


Figura 5.39: Blocos “XMLRPC Client”

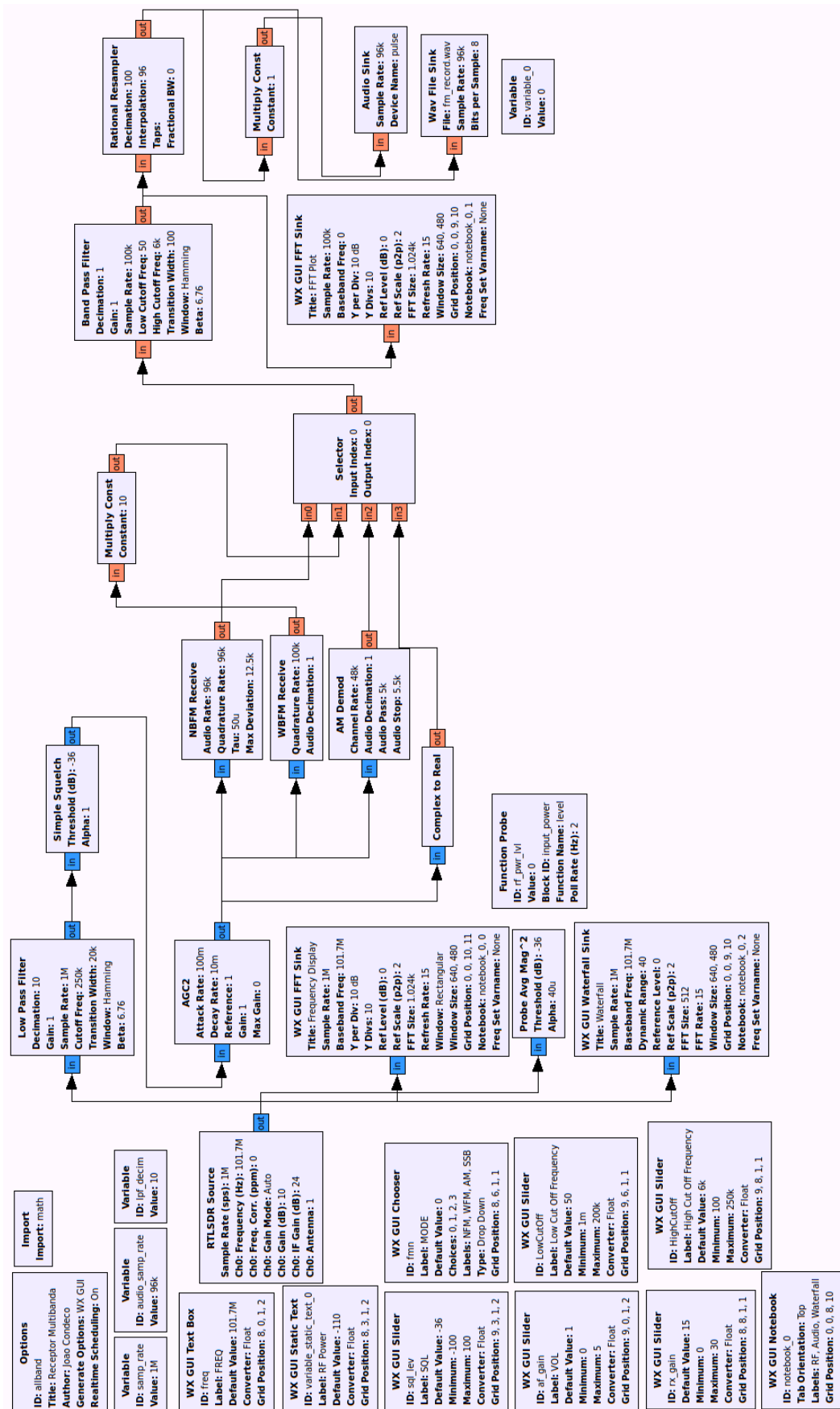
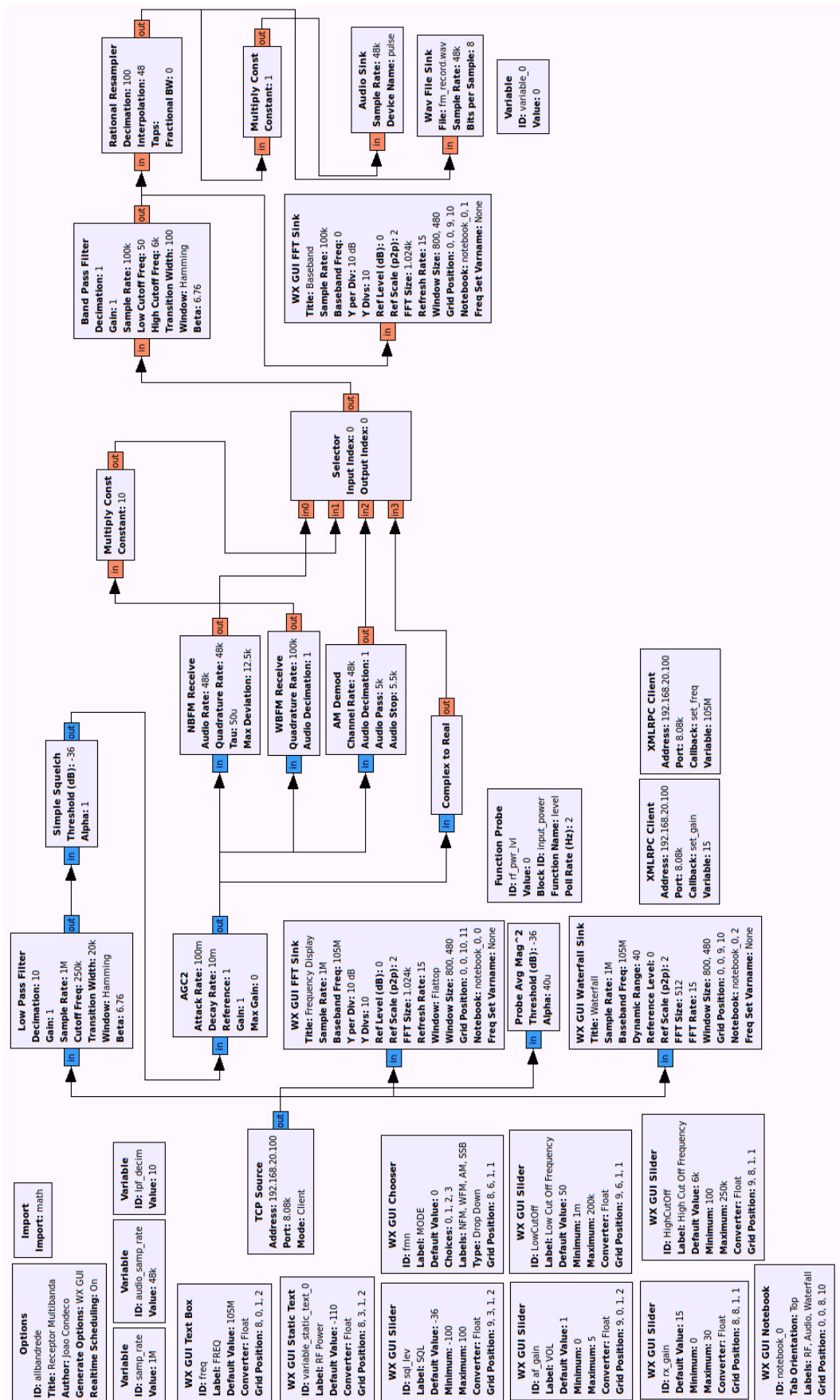


Figura 5.40: Receptor FM/AM/SSB implementado em GRC



Receptor FM/AM/SSB por stream implementado em GRC

5.8.5. – Funcionamento do programa

O resultado final obtido com a aplicação desenvolvida no GNU Radio pode ser visualizado nas três figuras seguintes.

Foi conseguida uma aplicação de aspecto agradável para o utilizador e com as funções de um rádio convencional. O sinal recebido pode ser visualizado em três modos já referidos seleccionados nas tabs presente no topo do programa. Por baixo do gráfico encontram-se os ajustes do sistema rádio.

O conjunto aplicação-RTLSDR foi testado em WFM, NFM e AM com excelentes resultados. A modulação SSB não efectivamente testada porque acima dos 51MHz (limite mínimo de recepção) é difícil de encontrar sinais de rádio neste modo credíveis.

A figura 5.42 mostra o sinal de uma rádio local (WFM).

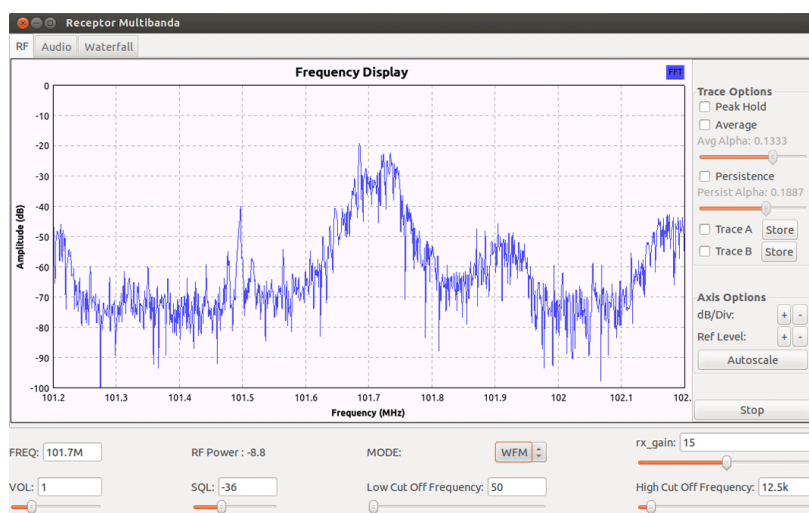


Figura 5.42: Espectro de sinal WFM

A figura 5.43 mostra um sinal digital em NFM de APRS nos 144.850MHz.

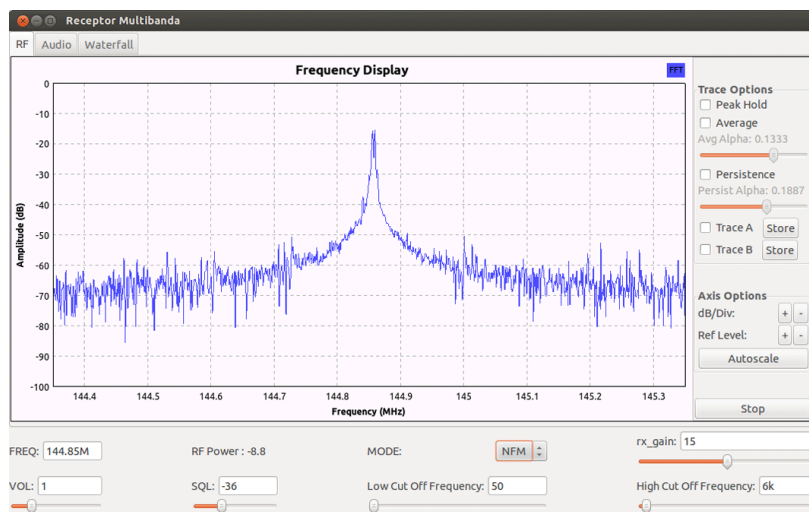


Figura 5.43: Espectro de sinal NFM

A figura 5.43 mostra uma transmissão da aviação civil em AM

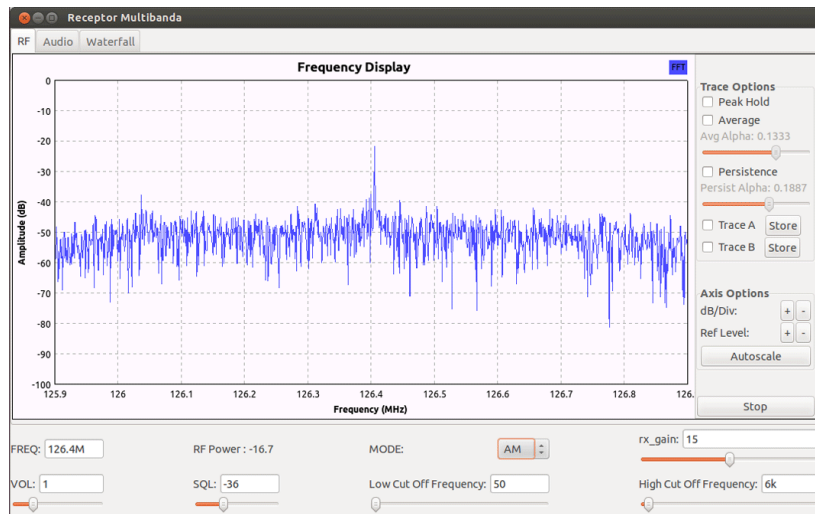


Figura 5.43: Espectro de sinal AM

Capítulo 6

Conclusões

6.1. – Resumo do trabalho realizado

O trabalho desenvolvido nesta dissertação tinha como objectivo criar um sistema de recepção de rádio remoto com recurso à tecnologia de *Software Defined Radio*, que permitisse ao utilizador não só a recepção de sinais de rádio, mas também o controlo e interacção, em *real time*, com os diversos parâmetros do sistema.

Sob o ponto de vista teórico, foi feita um estudo comparativo entre este tipo de receptores, baseados numa arquitectura definida por *software* e os tradicionais receptores de rádio constituídos por blocos físicos de hardware, a fim de avaliar o comportamento prático destes sistemas.

Sob o ponto de vista prático, foram testados três soluções para dar resposta ao problema inicial a que esta dissertação se propôs - a criação de um receptor rádio *online*.

Na primeira solução, foi posto em prática um receptor utilizando a placa de desenvolvimento do chip CMX992. No entanto, a limitação da placa (gama de frequência fixa) impediu o melhor estudo do sistema com vista a criar um protótipo. Apesar desta limitação, foram obtidos alguns resultados práticos interessantes.

Na segunda solução, foi utilizado um receptor comercial, o FUNcube Dongle desenvolvido pela AMSAT-UK e uma plataforma java, e o WEBSDR, para desmodulação dos sinais. Os resultados foram interessantes, mas o receptor tem um custo relativamente elevado, cerca 150€, além disso o *software* destina-se apenas a uso por amadores.

Com o aparecimento no mercado de pens USB receptoras de DVB-T de baixo custo, baseadas no chipset Realtek RTL2832U e no Elonis E4000, e posterior descoberta do Antti Palosaari para as suas potencialidades de receptor de rádio, tornaram esta a solução mais viável e atractiva para a implementação de um completo sistema de rádio remoto. Para isso, foi desenvolvido em GNU Radio uma aplicação que permite controlar todos os parâmetros geralmente essenciais presentes num rádio convencional. Com recurso a uma ligação de internet, podemos remotamente fazer esses ajustes.

Quanto aos resultados em si, foi conseguido o desenvolvimento de um sistema de rádio composto por uma aplicação gráfica desenvolvida através do GNU Radio e um receptor DVB-T, que em conjunto formam um *Software Defined Radio* de excelente performance e baixo custo, permitindo uma sintonia de frequência na gama dos 51 aos 1900MHz.

6.2. – Trabalho futuro

Tendo em conta o trabalho realizado, ainda existem alguns aspectos que poderão ser desenvolvidos e melhorados em projectos futuros. Alguns pontos a melhorar seriam:

Melhoria da estabilidade

Como foi referenciado anteriormente, o sistema requer alguns cuidados de utilização consoante o tipo de arquitectura de processamento utilizada, estando a largura de banda máxima dependente disso mesmo. Por isso a taxa máxima de amostragem é um aspecto essencial do projecto, a sua definição é efectuada previamente e após a compilação do projecto e criado o ficheiro executável, a mesma não pode ser alterada. Uma melhoria na estabilidade e melhor compatibilidade com o computador utilizado passaria pela adopção de um novo parâmetro no sistema que permitisse o ajuste da “*sample rate*” no próprio programa.

Aspecto gráfico

Um ponto interessante seria a melhoria gráfica do programa, retirando as opções laterais do display gráfico e colocando-as num interface de segundo plano sob a forma de opções. Outro aspecto é uma melhor adaptação às diversas resoluções de imagem.

Maior interacção com o rato

À semelhança do que acontece com a maioria dos programas disponíveis para SDR, a utilização do rato sobre o espectro permite uma maior facilidade e rapidez na sintonia das estações. No estado actual apenas permite a leitura dos valores e não o seu ajuste.

Ajuste de frequência

O ajuste da frequência é efectuado apenas através da forma numérica, colando a frequência respectiva com no máximo três casas decimais seguida da letra correspondente à unidade métrica. As frequências do tipo das utilizadas pela banda PMR (446.00625) não são possíveis. Uma melhoria passaria não só pela solução deste problema, como também pela adopção de uma barra que permita o ajuste da frequência a grosso modo e outra para um ajuste mais fino.

Gravação do áudio

A função de gravação de áudio está implementada no programa, mas a sua execução tem início com a abertura do programa e o seu fim com o terminar do mesmo. Não está disponível qualquer opção de paragem ou início e a localização de destino dos ficheiros de gravação obtidos

após a compilação do projecto não pode ser alterada. O programa também não dispõe de função de play.

Memorização das configurações e banco de memórias

Após a execução do programa as configurações de defeito do programa são carregadas e qualquer sintonia ou ajuste efectuado é posteriormente perdido. A sintonia é efectuada de forma manual.

Uma melhoria passaria pela adopção das configurações do sistema sob a forma de um ficheiro e a introdução de um banco de memórias que permitisse ao utilizador a memorização das suas estações preferidas.

Duplo receptor

À semelhança do que acontece com muitos receptores convencionais, a dupla recepção constitui uma mais-valia para o equipamento.

Apesar de no caso não ser possível implementar 2 VFOs totalmente independentes, pois apenas é recebido uma pequena gama do espectro, mesmo que reduzida, a sua implementação permitiria a monitorização de duas frequências em simultâneo. A sua implementação passará pela replicação da parte receptora e posterior mistura do sinal desmodulado.

RDS

O *Radio Data System* (RDS), sendo um sistema de transmissão de dados digitais utilizando os emissores de radiodifusão em FM, permitiria a visualização de várias informações como o nome da rádio ou tipo de programação.

Acesso IP

O sistema de recepção remoto apenas permite a utilização de IP's fixos. Uma maior versatilidade e facilidade de implementação do sistema passariam pela implementação de IP's dinâmicos.

Múltiplos utilizadores

A adaptação do sistema, a múltiplas ligações TCP/IP permitiria que vários utilizadores em simultâneo pudessem receber via stream parte do espectro, efectuando cada um a sua sintonia e ajustes desejados independentemente.

Apêndice A

Instalação e configuração da placa de desenvolvimento da CML

A.1 Instalação do Software

Efectuar o *download* do ficheiro ES000243.zip [26] do site da CML. Após o *download*, o arquivo deve ser descompactado. A pasta contém o programa executável, não requer instalação, basta correr o executável ES000243 e o driver para a comunicação da placa via USB com o PC. De notar que o programa corre apenas sobre o sistema operativo Windows (XP, Vista e Seven), mas antes disso devem ser executados os seguintes procedimentos:

- A placa de desenvolvimento de ser alimentada com 12V;
- Deve ser ligado um cabo USB ao PC;
- Deve ser instalado o driver (encontra-se dentro do arquivo ES000243.zip) quando pedido.



Figura A.1: Placa de desenvolvimento da CML

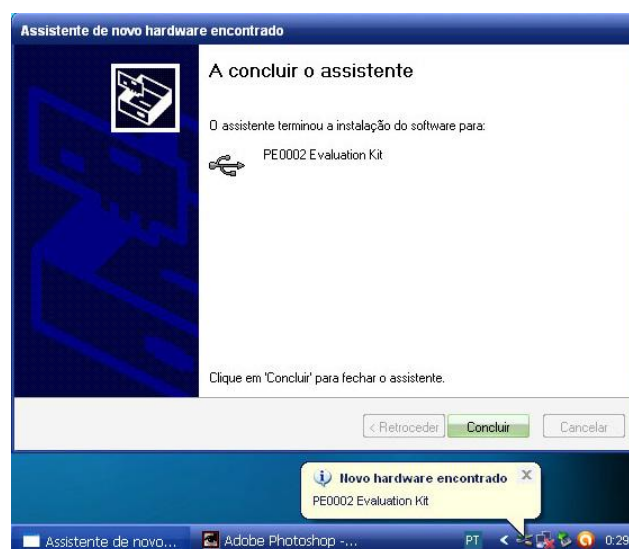


Figura A.2: Instalação do driver da placa PE0002

Após os procedimentos indicados, o sistema de desenvolvimento encontra-se ligado e devidamente pronto para a configuração, para tal deve ser executado o ficheiro ES000243.exe.

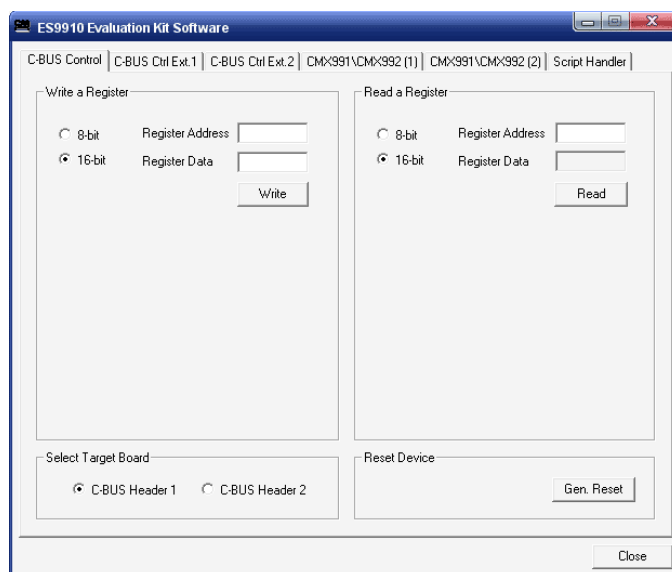


Figura A.3: Janela do programa ES000243

Neste primeiro menu (C-BUS control) encontra-se a configuração do C-BUS, que deve ser seleccionada no C-BUS Header 1.

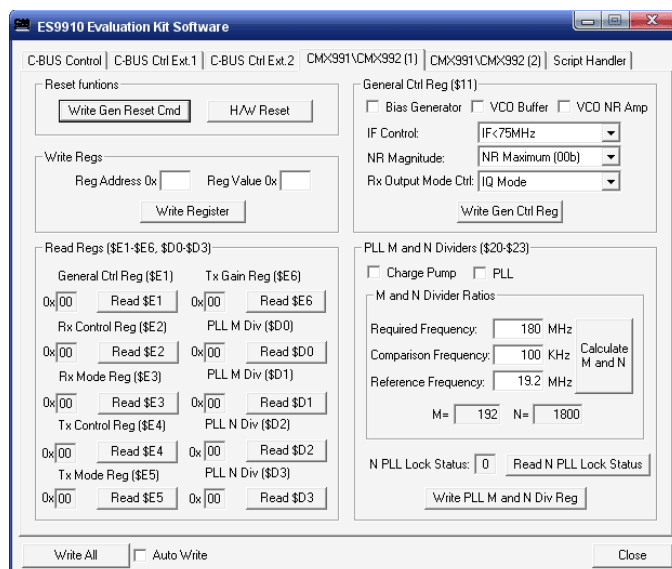


Figura A.4: Janela de configuração dos parâmetros do CMX991/992

Para configurar o sistema receptor de rádio são necessários os seguintes instrumentos:

- Um Gerador de sinais
- Fonte de alimentação de 12V
- Uma antena

- Um cabo com *jack stereo* de 3.5mm

Procedendo-se do seguinte modo:

- Ligar um gerador de sinais na ficha SMA “LO” com uma potência de -10dBm e uma frequência de: $Freq_{OL} = 2 \times Freq_{rx} + 90$
Onde $Freq_{OL}$ representa a frequência do oscilador local e $Freq_{rx}$ a frequência de recepção
 - Ligar a ficha “I/Q” através do cabo *stereo* com *jack* de 3.5mm à entrada da placa de som do PC
 - Ligar à antena à ficha SMA correspondente;
 - Ligar à ficha de alimentação os 12V e ligar o interruptor;
 - Correr o *software*;
 - No menu “General Control Register” seleccionar as opções:
 - IF<75MHz
 - NR Minimum
 - I/Q mode
 - Activar a opção Bias generator
 - Activar o VCO Buffer
 - Activar o VCO NR Amp
 - No menu “RX Control” seleccionar as opções:
 - LO/2 mode
 - RX 1st mixer
 - IF Amp/VGA, I/Q Mixers e B/B Differential AMps
 - LNA Control Signal
 - Para um ganho máximo seleccionar no menu “RX Mode” as opções:
 - I/Q Filter BW = 100KHz
 - MIXOUT1 and IFIN1
 - No menu “PLL M and N dividers register” seleccionar as opções:
 - Activar o charge pump
 - Activar o PLL
 - Required frequency=180MHz
 - Comp frequency=100MHz
 - Ref frequency=19.2MHz

Apêndice B

Manual do utilizador das aplicações em GNU Radio

B.1 Introdução

Os aplicativos *allband*, *allbandrede* e *server* destinam-se a controlar receptores de DVB-T baseados no chipset da Realtek RTL2832U. Para tal, foram desenvolvidas três aplicações, uma destinada ao controle do receptor directamente, no próprio PC (*allband*) e outras duas aplicações, funcionando em simultâneo para a utilização em rede (*allbandrede* e *server*). As aplicações *allband* e *allbandrede* são semelhantes, variando apenas na fonte sinal, uma recebendo directamente do receptor (*allband*) a outra recebendo o sinal por *stream* (*allbandrede*) via rede através do outro aplicativo (*server*).

O aplicativo *allband* tem os recursos comuns à maioria dos receptores de rádio convencionais. Nessas funcionalidades, estão ao dispor do utilizador:

- Ajuste de frequência
- Controlo de volume
- Ajuste do nível de ganho
- Squelch
- WFM, NFM, AM e SSB
- Ajuste de filtros
- Visualização gráfica do sinal
- Nível de potência média recebida

Este manual foi feito para o ajudar a conseguir utilizar os programas no seu computador. Por favor leia cuidadosamente antes de executar os aplicativos no seu sistema. Só assim poderá garantir uma correcta utilização sem problemas e um funcionamento fluido. Além disso poderá também tirar melhor partido das possibilidades que os três programas têm para oferecer.

B.2 Instalação

Os aplicativos fornecidos, *allband.py*, *server.py* e *allbandrede.py* desenvolvidos através do GNU Radio são ficheiros executáveis, para o sistema operativo Linux. Para tal basta apenas execução dos ficheiros, não sendo necessário o GNU Radio.

B.3 Iniciar com a aplicação

Para iniciar o programa, basta executar os ficheiros da seguinte forma:

```
./allband.py
```

```
joaoo@sdr: ~/Documents
joaoo@sdr:~/Documents$ ./allband.py
linux; GNU C++ version 4.6.3; Boost_104601; UHD_003.004.003
-255-gc7054ce5

Using Volk machine: sse3_32_orc
gr-osmosdr supported device types: file fcd rtl rtl_tcp uhd
Using device #0: ezcap USB 2.0 DVB-T/DAB/FM dongle
```

Figura B.1: Execução do programa

O programa é apresentado sob a forma de uma janela contendo um display gráfico sinal, e um conjunto de parâmetros com definições por defeito.

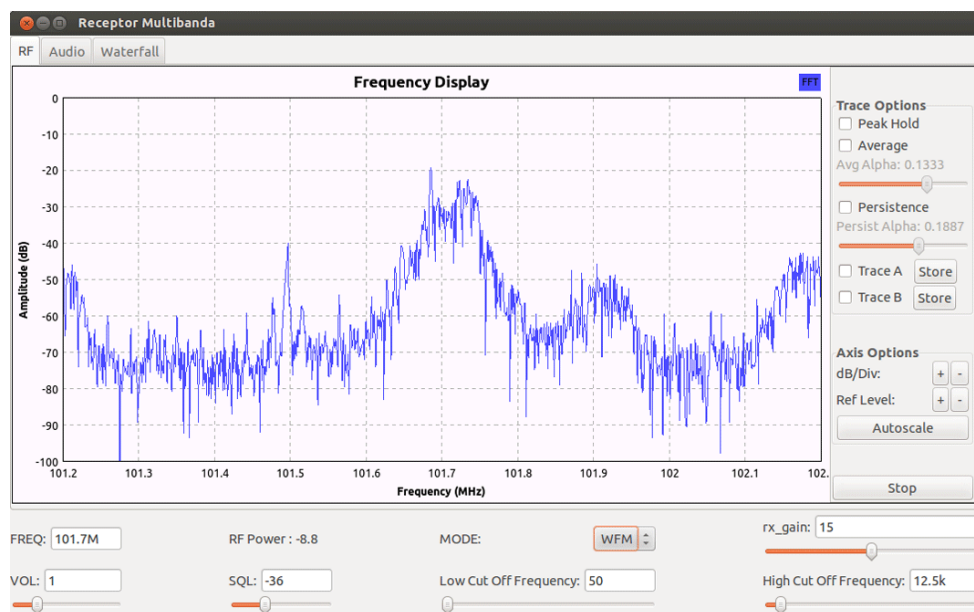


Figura B.2: Ambiente gráfico do programa

B.4 Utilizando os programas

O receptor multibanda (figura B.2) dispõe de três mostradores gráficos distintos, a sua selecção é feita através das *tabs* situadas no cimo da janela (figura B.3).

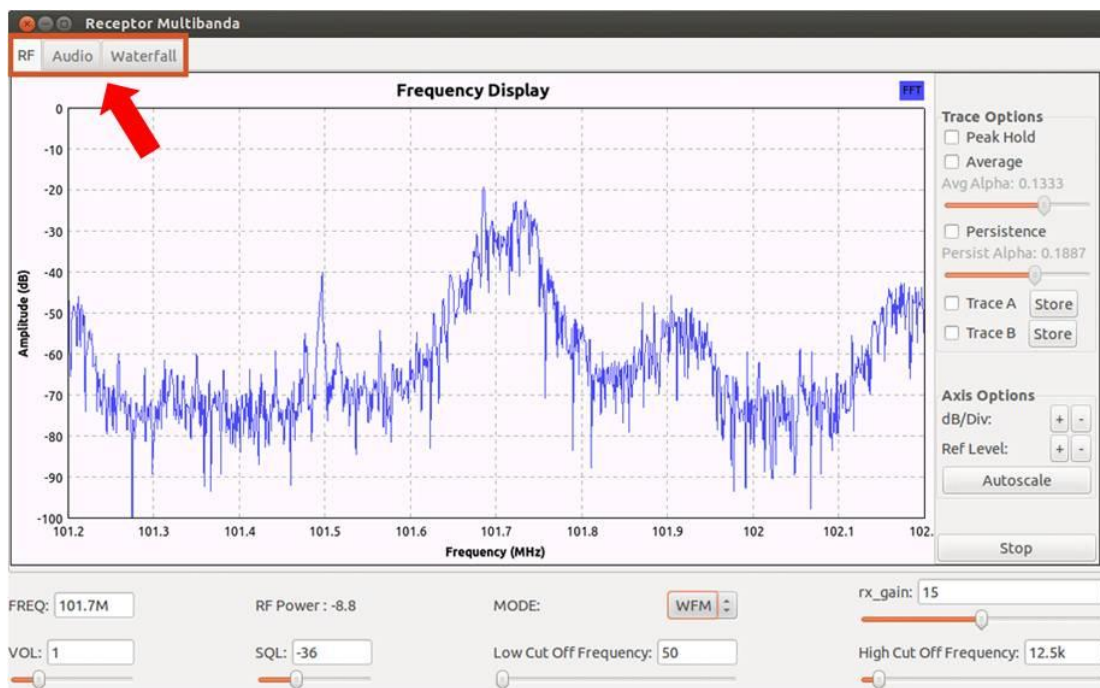


Figura B.3: Selecção dos mostradores gráficos

No primeiro mostrador “RF”, o utilizador tem ao seu dispor a visualização gráfica do sinal de RF recebido (figura B.4).

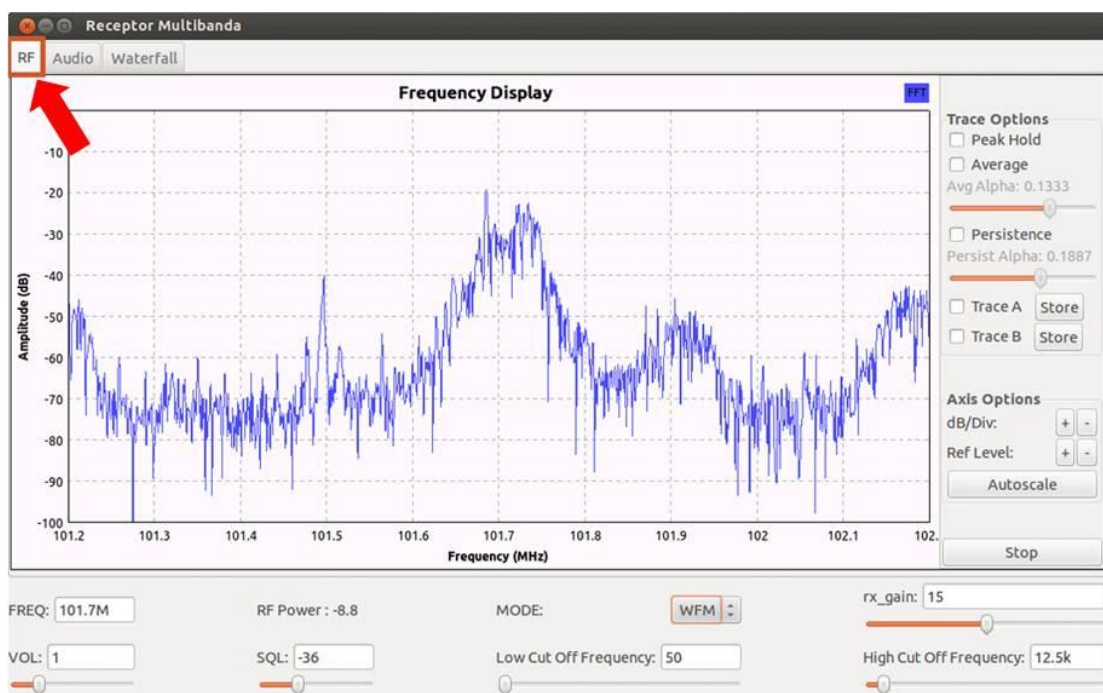


Figura B.4: Display do sinal de RF recebido

Na segunda tab “*Audio*”, o sinal é apresentado já desmodulado, em banda base (figura B.5).

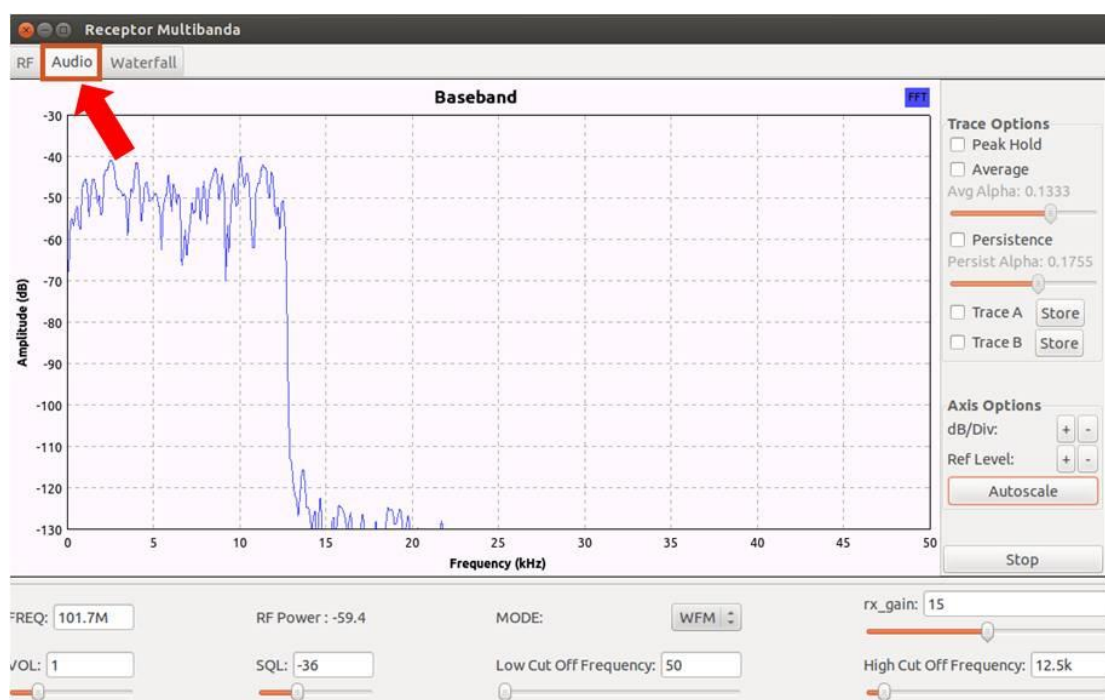


Figura B.5: Display do sinal recebido em banda base

Na última tab “*Waterfall*”, o sinal recebido é apresentado sob a forma de uma *waterfall* (figura B.6), onde a intensidade do sinal é mostrada sobre a forma de pontos de cor.

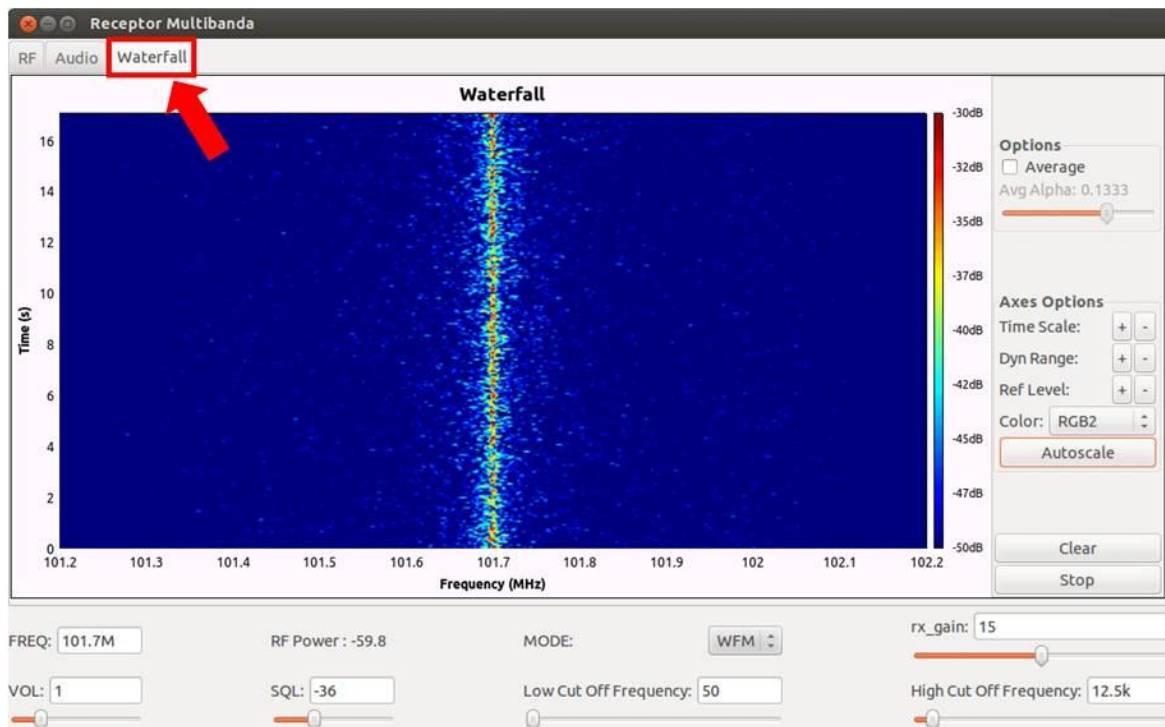


Figura B.6: *Waterfall* do sinal de RF recebido

Lateralmente aos gráficos existem algumas funcionalidades que permitem ajustar as escalas, fazer *autoscale* e seleccionar a medida média ou de pico.

Os ajustes dos diversos parâmetros do sinal, encontram-se por baixo do gráfico. Podem ser efectuados através do teclado com a introdução de valores numéricos, tendo em atenção no caso dos parâmetros “*FREQ*” e “*High Cut Off Frequency*” de especificar a unidade ou com o rato deslocando a barra existente por baixo do respectivo parâmetro.

No campo “*MODE*” (figura B.7) a selecção é exclusivamente efectuada com o rato do computador. De notar que ao mudar a modelação, o ajuste do filtro é automaticamente efectuado para a banda em causa.

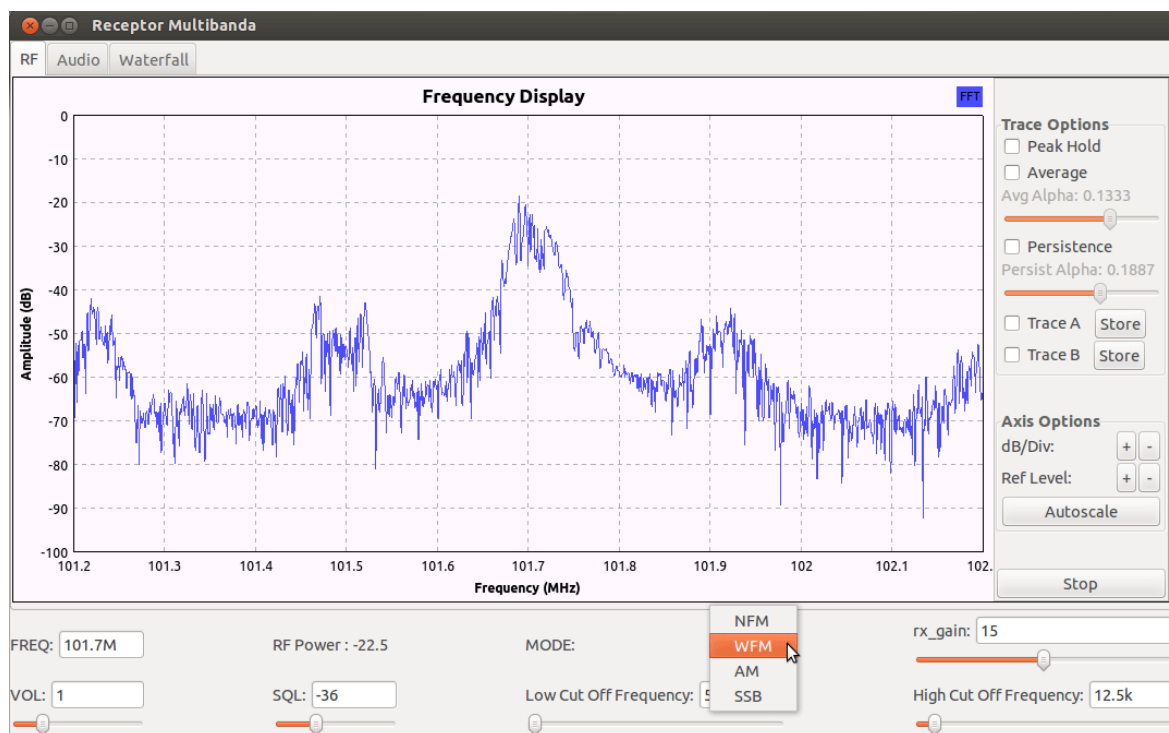


Figura B.7: Selecção da modulação do sinal

Bibliografia:

- [1] Occidental Schools, Cap. Radiocomunicação, 1983.
- [2] Quadro Nacional De Atribuição de Frequências. http://www.anacom.pt/streaming/qnaf06_versao_int.pdf?contentId=313152&field=ATTACHED_FILE
- [3] Aprenda tudo sobre "Código Morse", http://3.bp.blogspot.com/-ONmJIBCFV-4/Tx1eDjSmpl/AAAAAAAAA4k/yLbAwf9fzBA/s1600/morse_telegraph.jpg
- [4] N3ZN Model ZN-4A Iambic Paddle Morse Key, http://farm4.staticflickr.com/3348/3670262336_ef5af1aa4c_z.jpg
- [5] How to Build a VHF Radio, http://www.ehow.com/how_6587078_build-vhf-radio.html
- [6] Rádio de Galena, http://pt.wikipedia.org/wiki/R%C3%A1dio_de_galena
- [7] Intel 8085. http://pt.wikipedia.org/wiki/Intel_8085
- [8] What is a Software Defined Radio?, <http://wb8nut.com/styled/>
- [9] J. Mitola. The software radio architecture. Communications Magazine, IEEE, 33(5):26-38, Maio 1995.
- [10] Teófilo Monteiro. Projecto de um analisador de espectros baseado em SDR. Master's thesis, Universidade de Aveiro, 2010.
- [11] Software Defined Radio, <http://www.deetc.isel.ipl.pt/sistemastele/stds/Bibliografia/Slides/SDR.pdf>
- [12] GNU Radio: the open-source software defined Radio. <http://dev.emcelettronica.com/gnu-radio-open-source-software-defined-radio>
- [13] Universal Software Radio Peripheral 2. <http://www.olifantasia.com/gnuradio/usrp/files/usrp2.jpg.thumb.JPG>
- [14] João Carreira. Implementação em hardware de um analisador de espectros baseado em SDR". Master's thesis, Universidade Aveiro, 2010.
- [14] SAQrx - A VLF Receiver with Panoramic Tuning. <https://sites.google.com/site/sm6lkm/saqrx>
- [15] SAQrx - A VLF Receiver with Panoramic Tuning. <https://sites.google.com/site/sm6lkm/saqrx/saqrx.pdf?attredirects=0&d=1>
- [16] Receiver Test Data, <http://www.sherweng.com/table.html>
- [17] Walt Kester. "Which ADC Architecture Is Right for Your Application". Analoguen Dialogue 39-06, Junho 2001.
- [18] Voz sobre IP, http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Voip_HowItWorks_0203v2.jpg
- [19] VoIP (Voice over Internet Protocol), <http://www.tech-faq.com/what-is-voip.html>
- [20] Como funciona o VoIP, <http://informatica.hsw.uol.com.br/voip.htm>

- [21] Radio sobre IP básico. <http://www.voipfutura.com/VoIP-Futura-Radio/radio-sobre-ip-basico>
- [22] Introducing EchoLink . <http://www.echolink.org/>
- [23] Rede Portuguesa de Emissores. <http://rep.pt/geeklog/article.php?story=20121011181752533>
- [24] Distribuição de Streaming entre Servidores. http://www.netpoint.com.br/ajuda/index.php?title=Distribui%C3%A7%C3%A3o_de_Streaming_entre_Servidores
- [25] Renato Nogueira Perez Avila. Streaming - Aprenda a Criar e Instalar Sua Rádio ou TV na Internet
- [26] CMX992 RF Quadrature/IF Receiver IC for High Performance (100MHz to 1GHz RF) Radio Systems. <http://www.cmlmicro.com/Products/Index.asp?/Products/RF/CMX992.htm&/Products/Menus/ProdListMenu.htm>
- [27] Evaluation Kit Interface Card Software. <http://www.cmlmicro.com/techregister/log.asp?fname=/Products/evkits/software/ES000243.zip>
- [28] Portaria n.º 322/95, de 17 de Abril. <http://www.anacom.pt/render.jsp?contentId=958315>
- [29] FUNcube Dongle. <http://www.funcubedongle.com/>
- [30] A voluntary organisation that supports the design and building of equipment for Amateur Radio Satellites. <http://www.uk.amsat.org/>
- [31] FUNcube circuit. <http://img254.imageshack.us/img254/514/funcubeinternal.jpg>
- [32] Elonics E4000. <http://www.elonics.com/product.do?id=1>
- [33] A WebSDR is a Software-Defined Radio receiver connected to the internet, allowing many listeners to listen and tune it simultaneously. <http://www.websdr.org/>
- [34] Ubuntu. <http://www.ubuntu.com/>
- [35] rtl-sdr - OsmoSDR. <http://sdr.osmocom.org/trac/wiki/rtl-sdr>
- [36] Realtek RTL2832U. <http://www.realtek.com.tw/products/productsView.aspx?Langid=1&PNid=22&PFid=35&Level=4&Conn=3&ProdID=257>
- [37] RTLSDR Compatibility List. <http://www.rtlsdr.com/2012/04/rtlsdr-compatibility-list/>
- [38] GNU Radio – Introdução. <http://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio/wiki/PortuguesBR>
- [39] Pedro Smith Coutinho. Detecção de Energia para Rádios Cognitivos usando GNU Radio e USRP2. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011
- [40] Jonathan Janson. Radio Definido por Software: Estudo e Realização de Teste com uma Plataforma Livre. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, 2012